

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA

UNAN-Managua

Recinto Universitario Rubén Darío

Facultad de Ciencias e Ingenierías

Departamento de Construcción

Ingeniería Civil



TRABAJO MONOGRAFICO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

TEMA:

**Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la
comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas**

Tutor:

Msc. Horacio Ulloa López.

Autores:

Br. Genaro José Altamirano Navarro.

Br. Axell Exequiel Díaz Sandino.

Fecha: 19 de Junio 2015

Dedicatoria

Dedicamos esta tesis a Dios padre todo poderoso, quién nos guio por el buen camino, brindándonos fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándonos a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad, ni desfallecer en el intento.

A nuestras familias en especial a nuestros padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por la disponibilidad con los recursos necesarios para estudiar. Nos han dado todo lo que somos como persona, nuestros valores, principios, carácter, empeño, perseverancia y coraje para conseguir nuestros objetivos.

A nuestros hermanos por estar siempre presentes, acompañándonos para poder realizarnos.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a Dios nuestro creador. De igual forma un agradecimiento especial a:

- Msc. Horacio Ulloa, tutor de esta investigación, por su paciencia, disposición y por todo el tiempo que dedico.
- Nuestros padres por estar siempre dispuesto a brindarnos su apoyo incondicional.
- Departamento de Construcción y a todo su personal docente por trasmitirnos los conocimientos durante toda la carrera, para poder optar a ser ingeniero.
- Instituto de Geología y Geofísica IGG – CIGEO UNAN – Managua y su personal
- por su apoyo, en especial a: Francisco Vásquez, técnico de laboratorios IGG-CIGEO.
- Nuestros compañeros y amigos de la carrera de ingeniería civil.

INDICE

1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Problemática.....	3
1.3. Justificación.....	5
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos.	6
1.5. Limitaciones del Estudio.	7
2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	8
2.1. Pavimento.....	8
2.1.1 Elementos que conforman la estructura del pavimento.	8
2.2. Suelos	11
2.2.1. Origen y formación del Suelo.....	11
2.2.2. Tipos de Suelos Según la Geotécnica.	11
2.2.3. Estudios de campo.	12
2.2.4. Pruebas de Laboratorio.	13
2.2.5. Equipos para Determinación de CBR Indirecto	25
2.2.6. Suelos Cohesivos.....	29
2.2.7. Variación Volumétrica.....	30
2.3. Estabilización de Suelos.....	30
2.3.1. Historia de la Estabilidad.	31
2.3.2. Tipos de Estabilización	31
2.3.2.3. Estabilización Mecánica.....	33
2.4. Cal.....	33
2.4.1. Antecedentes del Uso de la Cal.....	33
2.4.2. Uso de la Cal en la Estabilización.....	34
2.5. Estabilización con Cal.....	35
2.5.1. Características Físicas.....	36
2.5.2. Características y Propiedades Químicas de la Cal.	37
2.5.3. Tipos de Cales usadas en la Estabilización.....	38
2.5.4. Especificación Estándar Para la Cal Viva Y Cal Hidratada Para La Estabilización de Suelos.	41
2.5.5. Reacción Química de la Cal con la Arcilla.....	41

3.	DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	44
3.1.	Localización.....	44
3.2.	Condiciones topográficas.....	45
3.3.	Historia de Inundaciones en el Área de Estudio.....	46
3.4.	Región Geológica.	47
3.5.	Descripción Geológica de la Estratigrafía de la Comunidad.....	48
3.5.1.	Basamento.	48
3.5.2.	Capas superficiales.	48
3.6.	Características de las Vías.	49
3.6.1.	Estudios Previos.	49
4.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	51
4.1.	Etapas 1: Recopilación de información, exploración y evaluación de los puntos críticos de las vías.	51
4.2.	Etapas 2: Muestreo de suelos	51
4.3.	Etapas 3: Análisis de Laboratorio	51
4.4.	Etapas 4: Estabilización de Suelos Cohesivos con Cal.....	52
4.5.	Análisis e Interpretación de resultados.	52
5.	DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS, EQUIPO Y PRUEBAS REALIZADAS.	53
5.1.	Recolección y muestreo de los suelos en la zona de estudio.....	53
5.2.	Caracterización de los suelos.	53
5.2.1.	Propiedades Índice.	53
5.2.2.	Pruebas de Resistencia.....	56
5.2.3.	Ensayo de Expansión (Prueba de Hinchamiento).....	65
5.3.	Estabilización de Suelos Con Cal Hidratada.	66
5.3.1.	Características y Propiedades de la Cal Utilizada en la Estabilización	67
5.3.2.	Análisis de los Materiales a Utilizar en una Estabilización De Suelos Con Cal. 67	
5.3.3.	Mezcla suelo-cal.	68
5.3.4.	Propiedades Modificadas en la Estabilización.	69
6.	ANÁLISIS E INTERPRETACION DE DATOS.	73
6.1.	La Recolección y Caracterización de los Suelos de la Comunidad San Isidro del Pegón.	73
6.1.1.	Trabajo de Campo.....	74
6.1.2.	Propiedades Físicas.	76

6.1.3.	Clasificación de Los Suelos de la Comunidad San Isidro.....	79
6.1.4.	Propiedades Mecánicas.....	79
	80
6.2.	Determinación de Porcentajes y Obtención del Porcentaje Optimo para la Estabilización.....	81
6.2.1.	Límites de Atterberg.	82
6.2.2.	Ensayo de Compactación Proctor Estándar.....	82
6.2.3.	Capacidad de Carga.....	83
6.2.4.	Expansión o Hinchamiento	83
6.3.	Reducir la Susceptibilidad de los Suelos al Hinchamiento.	84
6.4.	Contribución Sistemática a Métodos de Estabilización con Cal.	85
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
7.1.	Conclusiones.	86
7.2.	Recomendaciones.....	88
8.	REFERENCIAS.....	89
9.	ANEXOS.....	92
9.1.	Apéndice A: Localización y descripción de los Sondeos Principales.....	92
9.2.	Apéndice B: Ensayos de Laboratorio.	95
9.3.	Apéndice C: Graficas de las diferentes pruebas realizadas.	98
9.3.1.	Curvas Granulométricas	98
9.3.2.	Límites de Atterberg	100
9.3.3.	Curvas de Compactación del Suelo Estabilizado.....	101
9.4.	Apéndice D: STRATER.....	103



SIMBOLOGIA

F_{dr} = fuerza aplicada por el agitador

K_{flex} = rigidez de la placa flexible

X_2 = desplazamiento a la placa flexible

X_1 = desplazamiento al pie rígido

$\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia

K_{gr} = rigidez del suelo

n = número de frecuencias de prueba utilizado en el GeoGauge

V_2 = velocidad en la placa flexible

V_1 = velocidad de la placa al pie rígido

M_{int} = masa de los componentes internos adjunta pie rígido y del pie

τ = esfuerzo cortante

γ = deformación cortante

σ = presión ejercida sobre el área

ε = deformación unitaria.

L_P = Límite Plástico.

LI = Limite Liquido

W_w = Peso del Agua

W_s = Peso del Suelo Seco

K = Factor de Corrección

$\%W$ = porcentaje de Humedad

$G.S$ = Gravedad Especifica

γ_s = Densidad de Suelo

γ_w = Densidad del Agua

R' = lectura del Hidrómetro

L = lecturas efectivas (tabla)

K = factor de forma (tabla)

T = tiempo de lectura

I_p = Índice de plasticidad

γ_h = Densidad del suelo Húmedo

W_{sh} = Peso del suelo húmedo

V = Volumen dl suelo

γ_d = Densidad seca máxima

L_f = Lectura Final

L_i = Lectura Inicial

$\%E$ = Porcentaje de Expansión

$\Sigma L \leq 10^6$ = Valor de ejes Equivalentes



1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1. Introducción.

Los suelos juegan un papel fundamental en la ejecución de todo tipo de construcciones, sobre ellos se elevan las más prominentes obras ingenieriles que han pasado a través de la historia y que hoy en día fascinan nuestros ojos e impulsan a mejorar las técnicas empleadas en el proceso de construcción, con el fin de realizar otras estructuras mucho más complejas y minorando los riesgos de su construcción y operación. A medida que pasa el tiempo nos hemos visto en la necesidad de mejorar las condiciones que la naturaleza ofrece en cuanto a los suelos nos referimos, mejorando las características de mayor problemática durante la ejecución de obras; a este proceso se le denomina estabilización (Crespo, 2004)..

De las múltiples características que nos ofrecen los suelos, una de las de mayor importancia en el campo constructivo es la plasticidad, de esta dependen la estabilidad de la obra en sí, ya que produce efectos negativos para las estructuras. Entre estas se encuentra el hinchamiento que no es más que el cambio de volumen y la consolidación o asentamientos provocando fallas en las estructuras y en el peor de los casos pérdidas humanas por colapso de las mismas (Juárez & Rico, 2007).

Cuando en el ámbito de la construcción de caminos se encuentran suelos plásticos (arcillas), lo primero que se piensa es la manera de cómo solventar este problema y a menudo se soluciona con el desalojo de todo el material plástico generando así un mayor costo. Un buen tratamiento de los suelos plásticos mediante una estabilización, permitirá utilizar los suelos del lugar donde se realizará una obra, bajando costos de préstamo, desalojo y acarreo de material (Maldonado H. & Orellana A., 2009).

Según datos estadísticos del Ministerio de Acción Social (MAS, 2008) en colaboración con el MAGFOR, el 63.68% de la extensión del municipio de potosí corresponden a suelos arcillosos que se expanden durante la estación lluviosa y se contraen formando grietas en la estación seca.



El objetivo principal de este estudio es realizar la estabilización de las arcillas presentes en las vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, con una mezcla de cal, esta comunidad se encuentra ubicada en el municipio de Potosí, departamento de Rivas. Puesto que presenta múltiples áreas con comportamiento plástico, además de la ausencia de vías rurales acondicionadas con carpetas de rodadura a base de asfalto, adoquín o concreto hidráulico y la problemática de acceso para exportación de productos durante la época de lluvias.

Con el diseño y técnica de construcción apropiado, el tratamiento con cal transforma químicamente los suelos plásticos en materiales utilizables como estructura de pavimento, mejorando características y propiedades del suelo entre estas la resistencia a la compresión y capacidad portante (Maldonado H. & Orellana A., 2009).

La estabilización de las arcillas, se llevó a cabo luego de caracterizar el suelo, determinando sus propiedades tanto físicas como mecánicas mediante estudios de campo y pruebas de laboratorio, basadas en las normas ASTM (American Section for Testing Materials) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Los datos obtenidos fueron analizados para realizar dosificaciones de suelos arcillosos con diferentes proporciones de cal.



1.2. Problemática.

Actualmente los costos de construcción de vías son bastante elevados y de igual manera el mantenimiento de las existentes, debido al rápido deterioro que sufren a causa de diferentes factores, principalmente climatológicos. El empedrado fraguado y balastrado de calles es comúnmente utilizado en vías de baja intensidad o caminos rurales, sin obtener resultados satisfactorios, debido a que cada año el invierno causa deterioros progresivos tanto en la superficie como en la estructura del mismo (Metodos de Estabilizacion de Suelos, 2010).

La comunidad de San Isidro se caracteriza por ser una zona bastante regular, con baja incidencia a los desastres naturales, sin embargo se ha visto afectada por las intensas lluvias en fenómenos climáticos intensos. Entre estos el huracán Juana 1988 y el huracán Mitch 1998, periodo durante el cual esta comunidad estuvo prácticamente incomunicada (INETER, 2005).

Este fenómeno se debe en su totalidad al comportamiento plástico del suelo, el cual es característico en gran parte de las comunidades del departamento de Rivas, (la presencia de suelos de tipo vertisoles en común, ya que más del 80% del departamento se compone de estos suelos). Estos al ser expuestos a la humedad producto de las lluvias, aumentan su volumen disminuyendo su resistencia cortante, fenómeno comúnmente conocido como hinchamiento (Herrera & Ortiz , 2013).

Por otro lado estos suelos al perder el exceso de humedad presentan un agrietamiento, aparentemente superficial, sin embargo este puede ser profundo en el extremo de presentar cortes transversales a lo largo de las vías. La alcaldía de esta municipalidad ha realizado proyectos de mantenimiento vial, pero las labores que ejecutan son por así decirlo, superficiales, ya que solo cortan parte del material; que incluso es el material que anteriormente fue utilizado para rasante.

Luego realizan un recubrimiento y posteriormente se compacta, no obstante el poco desnivel existente y las irregularidades sobre la misma vía, provocan el



estancamiento de las aguas y la infiltración llega hasta base compuesta por la arcillas de la zona. Todo lo anteriormente descrito repercute en las actividades económicas de la comunidad, ya que es una zona potencialmente productiva, entre las cuales destacan el cultivo de caña de Azúcar y el cultivo de plátano.

Estos rubros se ven afectados debido a la dificultad de transporte, por lo que es mal pagado a los productores y comercializado a precios exagerado en los mercados del país.



1.3. Justificación.

Los suelos con alta plasticidad a lo largo de la evolución de las obras ingenieriles, han representado un obstáculo, el cual muchas veces se prefiere reemplazar en su totalidad, que ser tratado para mejorar sus propiedades. Este proceso mejor conocido como estabilización ha sido implementado, sin embargo los elementos utilizados pueden resultar en gastos iguales o mayores que el de reemplazar el material (Gamica, Pérez, & Obil, 2002).

La presencia de los suelos cohesivos en la obras viales puede ser poco evidente si las vías constan con carpetas de rodadura asfálticas, de concreto o el caso de adoquinados; caso contrario en las vías rurales las cuales solo comprenden una capa de terreno natural recubierto con algún material de banco. Tal es el caso de la comunidad de San Isidro del Pegón, la cual se encuentra desprovista de edificaciones y estructuras viales significativas (MIFIC, 2007).

Debido a que es una zona rural bastante alejada de urbanizaciones y que los suelos son bastante fértiles, se ha centrado en las actividades agrícolas y un menor grado la ganadería. De lo anteriormente descrito se plantea la propuesta de estabilización de las arcillas presentes en esta comunidad con una mezcla de cal, cuya concentración será determinada en los estudios planteados.

De igual manera los estudios de suelos realizados en la comunidad podrán ser retomado por las autoridades locales, para la formulación de proyectos futuros y en caso de evaluar la incidencia de la cal como agente estabilizador, podría utilizarse como un proyecto piloto aplicándolo al tratamiento de los suelos de esta comunidad. A demás este documento pretende servir de base a estudios que pudieran realizarse en comunidades que presenten el mismo problema.

A su vez se pretende promover a la realización de estudios a los suelos de nuestro país, para constatar las variantes que tienen la aplicación de los métodos descritos. Construir así un manual base y utilizarse en la ejecución de proyectos reales.



1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

- 1) Estabilizar los suelos cohesivos de las vías en la comunidad San Isidro del Pegón, municipio de Potosí departamento Rivas, con una mezcla de cal hidratada.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- 1) Recolectar materiales a utilizar de diferentes puntos en las vías de la comunidad San Isidro del Pegón y determinar propiedades físico- mecánicas de los suelos.
- 2) Determinar porcentajes de los materiales estabilizantes a usar y con los resultados de las pruebas de laboratorio obtener una mejora en las características de los suelos cohesivos.
- 3) Reducir la susceptibilidad al hinchamiento por cambio de humedades en los suelos cohesivos.
- 4) Contribuir de manera sistemática al cálculo de la estabilización de suelos cohesivos con cal, mediante un proceso sencillo y confiable que pueda ser usado fácilmente.



1.5. Limitaciones del Estudio.

A continuación presentamos las restricciones a las que estuvo sujeta la realización de este estudio.

- 1) Este proyecto se enfoca al área del transporte, por lo que la delimitación de la zona y localización de calicatas es exclusivo a las vías de la comunidad.
- 2) Las calicatas se realizaron a orillas de las vías de acceso, 10 calicatas de las cuales 4 fueron a una profundidad de 2 metros y 6 a una profundidad de 1 metros. Esto debido al esfuerzo de realizar este tipo de trabajo para extracción de muestras.
- 3) La capacidad de carga (CBR) se determinó mediante métodos indirectos, con los equipos Geogauge y martillo de CLEG.
- 4) Para la estabilización se utilizó una cal específica, (Cal Hidratada).



2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Es este acápite se abordan los conceptos y normativas a las que está ligada la realización del estudio, tales como: Normas ASTM, clasificación de suelos método HRB, SIECA, etc. Debido a que el estudio está enfocado principalmente a las vías abordaremos algunos conceptos concernientes a pavimentos, a fin de lograr una mejor comprensión.

2.1. Pavimento.

Un pavimento es una estructura conformada por una serie capas, de diferentes espesores y materiales de diferentes calidades, las cuales al interactuar unas con otras ofrecen un grado de resistencia al paso de los vehículos.

2.1.1 Elementos que conforman la estructura del pavimento.

Según el Manual Centroamericana para Diseño de Pavimentos contemplado en SIECA (Secretaría de Integración Económica Centroamericana), estos se dividen en flexibles, semi-rígidos o semiflexibles, pavimentos rígidos y articulados (adoquines). Sin embargo las capas que lo componen generalmente son tres: Carpeta de rodadura, Base y Sub-base (Corro Prado, 1974).

2.1.1.1. La carpeta.

Es la parte que soporta directamente el tránsito vehicular y es la capa que se encarga de brindar las características funcionales al pavimento. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y transmite los verticales hacia las capas que yacen bajo ella (Corro Prado, 1974).

2.1.1.2. La base.

De acuerdo con la SIECA (2002), la capa de pavimento tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la sub-base y a través de esta a la subrasante, y es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura.

2.1.1.3. La sub – base.

Es la capa construida bajo la base y sobre la subrasante, esta capa puede ser o no construida dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante. Su



función básica es la de proporcionar una cimentación uniforme, para la correcta colocación y compactación de la base; en la medida de lo posible, debe también tener una función drenante, por lo cual esta capa debe carecer de materiales finos, la sub - base también cumple una función de transición entre la subrasante y la estructura del pavimento (MTI, 2010).

La granulometría y características de calidad con la que deben cumplir los materiales a emplearse en la construcción de sub – bases, es la que se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 “características de los materiales” (Arriaga, 2009).

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$\Sigma L \leq 10^6$
Limite Liquido, máximo	30	25
Índice de plasticidad, máximo	10	6
Valor soporte de California (CBR) mínimo	50	60
Equivalente de arena , mínimo	30	40
Desgaste los Ángeles, máximo	50	40
Grado de Compactación, mínimo	100	100

2.1.1.4. La subrasante.

Es la capa construida bajo la sub – base, su función es la de recibir las cargas transmitidas por el pavimento y transmitirlas en forma uniforme hacia la subyacente y el cuerpo del terraplén (MTI, 2010).

Si esta capa es de buena calidad, el espesor del pavimento será menor, con lo cual existirá un ahorro económico, sin perder calidad en el pavimento. Está se



encuentra conformada con suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de cortes o de la extracción de bancos.

Arriaga, (2009) dijo que de acuerdo al número de ejes equivalentes de tránsito esperados durante la vida útil del pavimento, se tendrán las siguientes consideraciones:

- Si el tránsito esperado es menor a 1 millón de ejes equivalentes, el espesor mínimo de esta capa será de 20 cm.
- Si el tránsito esperado es de entre 1 millón y 10 millones de ejes equivalentes, el espesor mínimo será de 30 cm.
- Si el tránsito esperado es mayor a 10 millones de ejes equivalentes, será requerido un diseño especial para esta capa.

Las características de calidad que deben cumplir los materiales que conformaran esta capa, de acuerdo a la norma de la SCT “N – CMT – 1 – 03, están establecidos en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. “Requisitos de calidad que deben cumplir la capa Subrasante” (Arriaga, 2009).

Característica	Valor %
Tamaño Máximo; mm	76
Limite Liquido; % máximo	40
Índice Plástico; % máximo	12
Valor soporte de California (CBR) ; % mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación; %	100±2



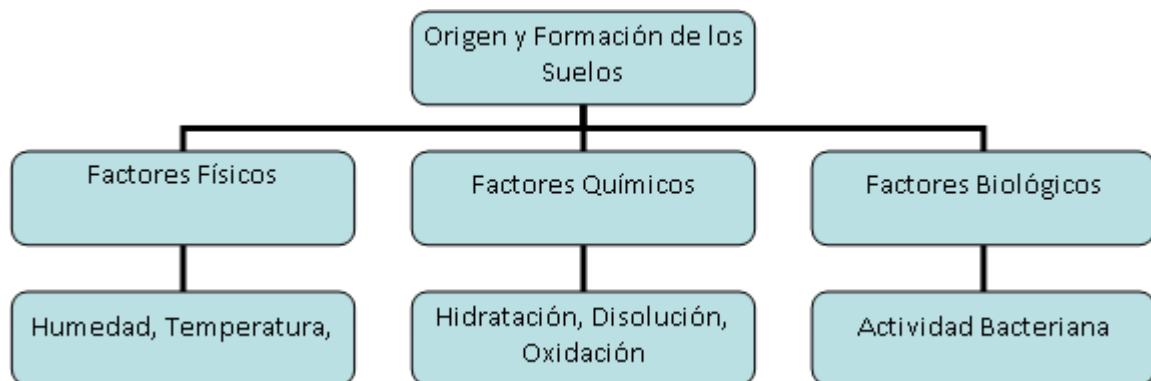
2.2. Suelos

Se denomina suelo a la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que proviene de la desintegración o alteración física, y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre ella. Los suelos son sistemas complejos donde ocurren una vasta gama de procesos físicos y biológicos que se ven reflejados en la gran variedad de suelos existentes en la tierra (Crespo, 2004).

Juárez & Rico (2007) dicen que hay muchos son los procesos que pueden contribuir a crear un suelo particular, algunos de estos son: la deposición eólica, sedimentación en cursos de agua, meteorización, deposición de material orgánico y la intervención humana en procesos específicos.

2.2.1. Origen y formación del Suelo

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas las cuales se presentan en el esquema 2.1:



Esquema 2.1: "Origen y Formación del suelo"

2.2.2. Tipos de Suelos Según la Geotécnica.

La clasificación de los suelos fue uno de los primeros objetivos de la mecánica de suelos. Antiguamente dicha clasificación se hacía en base a criterios puramente descriptivos. Actualmente la clasificación de suelos está basada en las propiedades mecánicas de los suelos.



A continuación se describen los suelos más comunes, con el nombre generalmente utilizados para su clasificación en el terreno según ASTM.

- Las Arenas y las Gravas: Son suelos de fragmentos granulares, redondos o angulosos, poco o nada alterados de rocas minerales. Estos suelos no poseen cohesión entre sus fragmentos.
- Los limos: Son suelos de grano fino (material que pasa malla No 200), pero con plasticidad menor a la que presenta una arcilla, los cuales generalmente cuentan con materia orgánica finamente dividida. Algunas veces contienen fragmentos visibles de materia vegetal parcialmente descompuesta o de otros elementos orgánicos.
- Las Arcillas: Son suelos formados de partículas derivadas de la descomposición química y mineralógica que sufren los constituyentes de las rocas, generalmente por intemperismo. Son suelos plásticos cuando están húmedos y cuando están secos son muy duros, tienen además permeabilidad extremadamente baja.

Para identificar un suelo se utiliza el nombre del material predominante como sustantivo y el de menor proporción como adjetivo calificativo. Por ejemplo Arena Limosa, indica un suelo en el cual predomina la arena y contiene cierta cantidad de limo (según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS).

2.2.3. Estudios de campo.

Son estudios realizados en situ, durante la elaboración de este proyecto se realizó la “Exploración y Muestreo de los suelos”.

Existen diferentes métodos tales como: explotación a cielo abierto, sondeos manuales, ensayos de penetración estándar o SPT y métodos rotativos en roca. No obstante en este estudio se utilizó el método de exploración mediante calicatas, debido a la complejidad de los demás métodos.



2.2.4. Pruebas de Laboratorio.

Dichas pruebas nos permiten conocer propiedades índice y características mecánicas de los suelos según las normativas ASTM y AASHTO. Estas normativas definen la determinación de las propiedades índice del suelo a través del método SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), para obras de tipo vertical y el método HRB (Highway Research Board) para obras horizontales.

Según Das (2001) para clasificar apropiadamente un suelo utilizando este sistema, deben conocerse el porcentaje de grava, el porcentaje de arena, el porcentaje de limo y arcilla, los coeficientes de uniformidad y curvatura y el límite líquido e índice de plasticidad. Los primeros cinco datos se obtienen a partir de un análisis granulométrico.

En este estudio se realizó la clasificación de los suelos mediante el sistema de clasificación HRB se basa en la trabajabilidad que tiene el suelo desde el punto de vista vial, clasificándolos en 8 grupos denominados A₁ - A₇ a medida que la numeración aumenta la dificultad para trabajarlo (extracción, movimientos, compactación, etc.) y menor calidad en la capa de estructura vial ejecutada.

El suelo A-1, es un suelo de propiedades óptimas para ser usado en las capas que conforman la estructura de un pavimento y en su orden ascendente de numeración, su comportamiento va decreciendo hasta llegar al suelo A-7, cuya aplicación en carreteras no es recomendable.

En la tabla 2.3 se presenta la descripción de los grupos y sub grupos contemplados en la norma AASHTO M-145:

Capítulo 2: Conceptos Fundamentales



Tabla 2.3 descripción de los grupos y sub grupos norma AASHTO M-145

CLASIFICACION GENERAL	SUELOS GRANULARES Pasa tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200) hasta el 35 %							SUELOS ARCILLOSO - LIMOSO Pasa tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200) más del 35 %			
CLASIFICACION POR GRUPOS	A – 1		A - 3	A – 2				A - 4	A – 5	A - 6	A - 7
	A - 1 – a	A - 1 – b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 – 7				A - 7 - 5 A - 7 - 6
Tamiz IRAM de 2 mm.N° 10	Máx 50										
Tamiz IRAM de 425 micrómetros N° 40	Máx 30	Máx 50	Min 51								
Tamiz IRAM de 75 micrómetros N° 200	Máx 15	Máx 25	Máx 10	Máx 35	Máx 35	Máx 35	Máx 35	Min 35	Min 35	Min 35	Min 35
Características de la fracción que pasa por tamiz IRAM 425 micrómetros N° 40											
Límite Líquido ^ω _L (%)	-	-	-	Máx 40	Min 41	Máx 40	Min 41	Máx 40	Min 41	Máx 40	Min 41
Índice de Plasticidad I _p (%)	Máximo 6		No plástico	Máx 10	Máx 10	Min 11	Min 11	Máx 10	Máx 10	Min 11	Min 11
Índice de Grupo IG	0	0	0	0	0	Máx 4	Máx 4	Máx 8	Máx 12	Máx 16	Máx 20
CONSTITUYENTES PRINCIPALES DE TIPOS MAS COMUNES	Fragmentos de rocas, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas arcillosas limosas				Suelos limosas		Suelos arcillosos	
COMPORTAMIENTO GENERAL COMO SUBRASANTE	Excelente a bueno					Regular a pobre					



El índice plástico del Sub - Grupo A - 7 -5 es igual o menor que Límite Líquido menos 30. ($IP \leq (L - 30)$).

El índice plástico del Sub - Grupo A - 7 -6 es mayor que Límite Líquido menos 30. ($IP > (L - 30)$).

El índice de Grupo debe ser indicado entre paréntesis después del símbolo del grupo (ej.: A-2-6 (3) y debe ser un número entero, si da menor que cero el IG es igual a cero. El IG no tiene límite pero se lo suele acotar a un valor máximo de 20.

$$IG = (F - 35) (0,2 + 0,005 (\omega_L - 40)) + 0,01 (F - 15) (IP - 10) \quad \text{Ec. 2.1}$$

F = % que pasa el tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200)

$$I_P = L_L - L_P \quad \text{Ec. 2.2}$$

2.2.4.1. *Propiedades Índice.*

A continuación se dan a conocer las propiedades índices de los suelos y su objetivo de análisis.

a) Humedad.

El contenido de humedad del suelo, se define como la cantidad de agua presente en el suelo al momento de efectuar el ensaye, relacionado al peso de su fase sólida, (Das, 2001). Los datos de humedad fueron calculados mediante la siguiente ecuación:

$$\%W = \frac{W_w}{W_s} * 100; \quad \text{Ec. 2.3}$$

Todos los suelos se componen de tres fases, sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está constituida por las partículas minerales, la parte líquida está representada principalmente por agua, y la gaseosa por aire (Juárez y Rico, 2004). Todas las fases ocupan un determinado volumen, y representan un determinado peso, con respecto al total de una muestra, (ver figura 2.1).

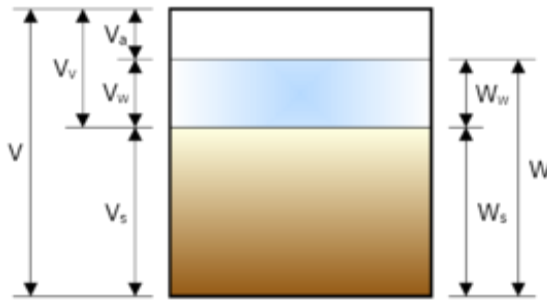


Fig. 2.1: Fase de los suelos, (Berry & Reid, 1993)

El objetivo principal de este ensaye es conocer la cantidad de agua presente en el suelo natural, esta se encuentra expresada en porcentaje y se utiliza posteriormente para determinar otras relaciones volumétricas. Estas pueden ser: peso específico, relación de vacíos, grados de saturación y el peso volumétrico.

b) Gravedad específica:

(Berry & Reid, 1993), Se define como Gravedad Específica de los Suelos, a la relación de la densidad de un suelo y la densidad del agua. El valor de la Gravedad Específica de un Suelo queda expresado por un valor abstracto; además de servir para fines de clasificación, interviene en la mayor parte de los cálculos de la Mecánica de Suelos, el valor de la misma varía entre 2.20 y 3.

La gravedad específica es una propiedad de los materiales muy importante. Se utiliza para el cálculo de volúmenes de vacíos, se utiliza también en el análisis del hidrómetro y es útil para predecir el peso unitario del suelo, especialmente para agregados finos; es importante indicar que la gravedad específica no es un indicador de calidad, esta se calcula a través de la siguiente expresión:

$$G.S = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \text{Ec. 2.4}$$

c) Análisis granulométrico.

La granulometría es muy importante en el proceso de clasificación de suelos, ya que permite en primera instancia separar la fracción gruesa de la fina. Además las características del tamaño de las partículas de un suelo, tienen gran



importancia en su comportamiento mecánico, e influyen considerablemente en la compactación adecuada de los suelos. La estabilidad de un suelo depende de su cantidad de vacíos, mientras esta sea menor mejor será el comportamiento del mismo. Para lograr que los vacíos de un suelo sean reducidos al mínimo es necesario que el material tenga una gama de tamaños que permita que los huecos resultantes del acomodo de las partículas mayores, sean ocupados por partículas más pequeñas.

Esta prueba se remite a determinar al tamaño o diámetro de las partículas que componen el suelo, existen diferentes métodos, dependiendo de la mayor proporción de tamaños que existen en la muestra que se va a analizar. Para las partículas Gruesas, el procedimiento utilizado es el Método Mecánico o Granulometría por Tamizado. Pero para las partículas finas, por dificultarse más el tamizado se utiliza el Método del Sifoneado o el Método del Hidrómetro, basados en la Ley de Stokes (Blanco & Matuz, 2006).

- **Granulometría por tamizado:** (ASTM International, 2007), es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, denominado a la fracción menor (Tamiz No 200) como limo, Arcilla y Coloide. Se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra, esto solo separa una porción de suelo entre dos tamaños.

El primer grupo es la fracción “gruesa”, que está conformada por las partículas mayores a la malla #200 (0.074mm). Y el segundo es la parte “fina”, la cual está conformada por todas aquellas partículas menores a la malla 200.

Se considera un suelo grueso, cuando el 50% del peso de una muestra queda retenido en la malla 200. Los suelos gruesos se subdividen en:

- a) gravas de símbolo genérico G.
- b) arenas, de símbolo genérico S.



Las gravas y las arenas se separan con la malla #4 (4.76mm). Se considera como grava a todo el material retenido en dicha malla, El material que pasa la malla #4 y es retenido en la malla # 200, es una arena.

Estos grupos G y S, se subdividen en cuatro grupos más, en función de su gama de tamaños, de la presencia de finos y la plasticidad de los mismos. De esta forma a cada grupo formado se le asigna un símbolo conformado por dos letras mayúsculas.

Cuando el 50% del peso total de la muestra traspasa la malla # 200, se dice que el suelo es fino. De la misma forma que los suelos gruesos, los finos se subdividen en tres grupos, en función de su índice plástico (IP). Estos tres grupos son:

- a) Limos inorgánicos, de símbolo genérico M.
- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo C.
- c) Arcillas y limos orgánicos de símbolo genérico O.

Al igual que los suelos gruesos, el símbolo consta de dos letras, esta segunda letra es asignada en función de su grado de compresibilidad, definida por el límite líquido (LL), esta segunda letra puede ser H, para una alta compresibilidad o L, para baja compresibilidad.

- **Análisis granulométrico por medio del hidrómetro:** (ASTM International, 2007), el análisis hidrométrico se basa en la ley de Stokes, la cual relaciona la velocidad de una esfera cayendo libremente a través de un fluido con el diámetro de la esfera. Se asume que la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños.

El diámetro se usa para determinar el porcentaje de partículas del suelo dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis del hidrómetro se aplica a partículas de suelo que pasan el tamiz No.10.

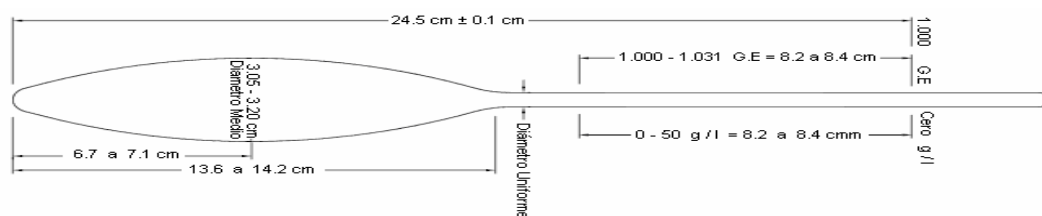


Figura 2.2 Características del hidrómetro, (Crespo Villalaz, 2004).



La tabla 2.4 muestra las ecuaciones utilizados en el cálculo de los parámetros de interés en esta prueba.

Tabla 6.1: Ecuaciones utilizadas en el ensayo.

Parámetro	ID	Ecuación
Corrección lecturas	2.5	$R = R' + 0.6 \times 10^{-3}$
Diámetro de Partículas	2.6	$D = K^* \sqrt{\frac{L}{t}}$

d) Límites de consistencia de los Suelos (Límites de Atterberg).

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

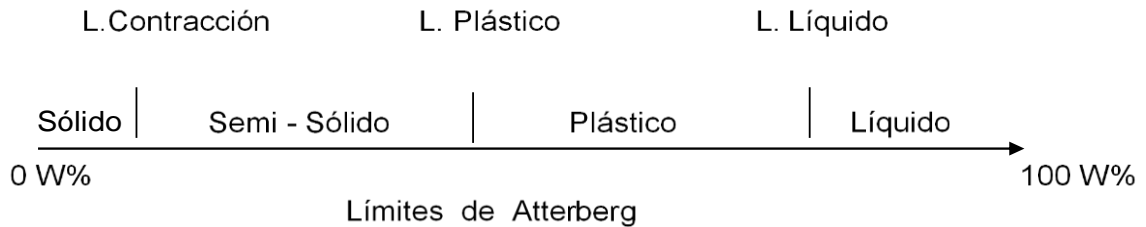
(ASTM International, 2007), los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse.

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico. Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que



se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo (Crespo, 2004).



Esquema 2.1. Límites de Consistencia

- **Límite Líquido (L.L):** (Crespo, 2004), el límite se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, que debe tener un suelo moldeado para una muestra del mismo en que se haya moldeado una ranura de dimensiones Estándar, al someterla al impacto de 25 golpes bien definidos se cierre sin resbalar en su apoyo, el límite líquido se obtiene con la expresión:

$$L_P = \%h_1 - \%h_2 \quad \text{Ec. 2.7 o bien}$$

$$LI = \left(\frac{W_w}{W_s} * 100 \right) * k \quad \text{Ec. 2.8}$$



Fig. 2.2: Fotografía “Copa de Casa Grande”, Fuente propia

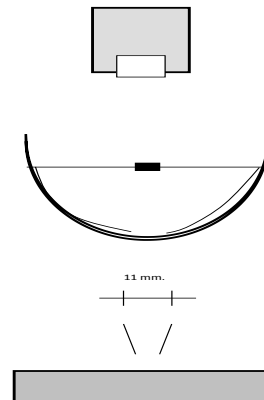


Fig. 2.3: Corte esquemático Copa de Casa Grande, (UNAN, 2011)



- **Límite Plástico (L.P.):** el límite plástico se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje, cuando comienza agrietarse un rollo formado con el suelo de 3 mm. De diámetro, al rodarlo con la mano sobre una superficie lisa y absorbente (Crespo, 2004).
- **Límite de Contracción:** el Límite de Contracción (L.C.) de un suelo se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual una reducción de agua no ocasiona ya disminución en el volumen del suelo. El límite de contracción es muy útil para evaluar el comportamiento de cortes y terraplenes principalmente en el posible surgimiento de grietas (Crespo, 2004).
- **Índice de plasticidad (IP):** el Índice de Plasticidad (IP) es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil.

El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad.

2.2.4.2. Pruebas de Resistencia.

En nuestro estudio se realizaron pruebas de CBR (California Bearing Ratio) y las pruebas de compactación Proctor. Estas pruebas fueron realizadas a fin de determinar la resistencia al esfuerzo cortante y capacidad de carga de los suelos en la comunidad San Isidro.

2.2.4.2.1. Pruebas de compactación (Proctor Estándar y Proctor Modificado).

El término compactación se utiliza en la descripción del proceso de densificación de un material mediante medios mecánicos. El incremento de la densidad se obtiene por medio de la disminución de la cantidad de aire que se encuentra en los espacios vacíos presentes en determinado material, manteniendo el contenido de humedad relativamente constante, (Berrios & Chavarría, 2011).

En la vida real, la compactación se realiza sobre materiales que serán utilizados para relleno en la construcción de terraplenes, pero también puede ser empleado el material in situ en proyectos de mejoramiento del terreno. El principal objetivo



de la compactación es mejorar las propiedades ingenieriles del material en algunos aspectos:

- Aumentar la resistencia al corte, y por consiguiente, mejorar la estabilidad, de terraplenes y la capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y, por consiguiente, reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos y, por consiguiente, reducir la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.

Para medir el grado de compactación de material de un suelo o un relleno se debe establecer la densidad seca del material. En la obtención de la densidad seca se debe tener en cuenta los parámetros de la energía utilizada durante la compactación y también depende del contenido de humedad durante el mismo.

Las relaciones entre la densidad seca, el contenido de humedad y la energía de compactación se obtienen a partir de ensayos de compactación en laboratorio. La compactación en laboratorio consiste en comprimir una muestra que corresponda a la masa de suelo que se desea compactar, con la humedad calculada y en un molde cilíndrico de volumen conocido y con una energía de compactación especificada, las densidades del suelo se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\gamma_h = \frac{W_{sh}}{V} \quad \text{Ec 2.9}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \left(\frac{\%h}{100}\right)} \quad \text{Ec. 2.10}$$



Factores que afectan el proceso de compactación de los suelos.

(Berrios & Chavarría , 2011), si se compacta un suelo por diversos métodos, la densidad obtenida será posiblemente diferente para cada uno; del mismo modo, si distintos suelos se compactan empleando el mismo método es de esperar que los resultados obtenidos sean también diferentes. Esto indica que el proceso de compactación de un suelo se encuentra afectado por una serie de factores, de los cuales los más determinantes son:

1. El tipo de suelo.
2. El método de compactación.
3. La energía de compactación.
4. El contenido de agua del suelo.
5. La recompactación del suelo.

La Prueba Proctor Standard

Este ensayo se encuentra estandarizado por la ASTM D-698. Los parámetros que se obtienen de este ensayo son el peso unitario seco máximo y el contenido de humedad óptimo.

La compactación es la densificación del suelo debido a la eliminación del aire por medio de energía mecánica para así obtener del suelo mayor resistencia, menor deformación y permeabilidad. El grado de compactación se mide en términos del peso unitario seco del suelo. Al compactar se añade agua, el peso unitario seco que se obtiene de la compactación viene dado por el contenido de humedad óptimo que es diferente para cada tipo de suelo.

La diferencia entre el Proctor estándar y el modificado radica en la energía empleada en el proceso de compactación, lo que genera una mayor reducción en el porcentaje de vacíos.



2.2.4.2.2. Pruebas de CBR

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos, (ASTM International, 2007) .

(Blanco & Matuz, 2006), el ensayo CBR (California Bearing Ratio), consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo Proctor y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón. Se mide así la capacidad portante del suelo o lo que es lo mismo su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en % del valor de referencia. Cuanto más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.

Como se expresó anteriormente esta prueba permitió determinar la resistencia al esfuerzo cortante y la capacidad de carga de los suelos de la comunidad de San Isidro.

- Resistencia al Esfuerzo Cortante.

Uno de los puntos fundamentales de la mecánica de suelos es la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Es imprescindible contar con este concepto al tratar de aplicar la mecánica de suelos al análisis de estabilidad de obras civiles. En teoría la resistencia al esfuerzo cortante en los suelos está dada por, el ángulo de fricción interna ϕ en los materiales 100% granulares y por la cohesión c , en los suelos puramente cohesivos (arcillas homogéneas), la cual depende de la humedad del suelo, sin embargo en la mayoría de los suelos la resistencia al esfuerzo cortante está dada por la combinación de ambos parámetros, (Berry & Reid, 1993).



Existen principalmente dos métodos experimentales para determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, las pruebas de compresión (triaxial y simple) y de corte directo, las pruebas triaxiales, son actualmente la más utilizadas, ya que permiten controlar y medir las presiones actuantes en tres direcciones. El espécimen es colocado en una cámara hermética y confinado mediante una membrana plástica, las presiones laterales se ejercen mediante un líquido a presión que llena la cámara, y la presión axial mediante un vástago metálico que comprime la muestra a velocidad constante, (Juárez & Rico, 2007).

Las pruebas se dividen en tres tipos, que tratan de representar los distintos factores circunstanciales que influyen en la resistencia al corte del suelo: la prueba consolidada-drenada o lenta (L), la prueba consolidada no drenada o consolidada rápida (Rc), y la prueba no consolidada-no drenada o rápida (R), (Berry & Reid, 1993) .

2.2.4.2.3. Capacidad de Carga.

El suelo recibe la carga total de una estructura, a través de la cimentación, la capacidad de carga del suelo es la carga máxima que este puede soportar por unidad de área. Una vez rebasada la capacidad de carga el suelo sufre asentamientos o fractura, lo que implica daño a la estructura. Una cimentación bien diseñada transmite las cargas al suelo, sin llegar a solicitar la capacidad máxima del mismo, (Das, 2001)

2.2.5. Equipos para Determinación de CBR Indirecto

Aunque estos los estudios anteriormente descritos son comúnmente usados para determinar el CBR, se emplearon dos equipos diferentes, como son el “Geogauge y martillo de CLEGG”. Aunque son equipos que determinan esta característica indirectamente, presentan un ahorro de tiempo y una operabilidad de mayor eficiencia, a continuación se describen sus características, su funcionalidad y objetivo.



2.2.5.1. *Martillo de CLEGG.*

El martillo de Clegg se desarrolló a principios de la década de los sesenta por el Dr. Baden Clegg en el departamento de ingeniería Civil de la Universidad del Oeste de Australia, se argumentó que su uso se remitiría inicialmente para analizar cuantitativamente las propiedades de resistencia de los suelos. En 1976, este dispositivo fue introducido por primera vez en la 8va conferencia de Investigación de Carreteras de Australia; desde entonces, ha sido considerablemente usado en Australia y Europa. En la actualidad es manufacturado en Estados Unidos y está siendo aplicado por consultores y contratistas en varias aplicaciones de los procesos de control de compactación en carreteras, caminos etc.

Actualmente es utilizado como aparato de prueba de impacto de suelo in-situ que se usa para medir la “rigidez” de las condiciones de suelos naturales o trabajados. Fácil de transportar y de operar por una sola persona, de bajo costo y eficiente en el terreno o laboratorio. El parámetro de resistencia es entregado en una lectura directa.

Se mide la resistencia de una capa de suelo de un grosor de hasta 6” (150mm) y se infiere la condición de compactación de esta capa. Con una masa conocida, el martillo Clegg es dejado caer desde una distancia determinada y se mide su desaceleración al impactar la superficie del suelo. Cuatro ensayos sucesivos se usan para obtener el VI (valor de impacto) que se correlaciona directamente con el ASTM California Bearing Ratio, Texas Class Number, y Módulo Elástico.

Se puede usar para probar el rango total de suelos y piedras suaves con que uno se encuentra en un pavimento flexible y en lugares de movimientos de tierra. Es ideal para medir la máxima resistencia, porque no se requiere de pesaje ni de secado. Fácil y rápido de usar, cada prueba puede ser efectuada, en menos de 30 segundos, por personal de terreno, con un mínimo de entrenamiento.

Desde su creación ha existido un gran interés por correlacionar el valor de impacto de Clegg (VIC) con el California Bearing Ratio (CBR), el Dr. Baden



Clegg, creador del instrumento, fue el primero en relacionarlos en la conferencia geotécnica de Nueva Zelanda en el año 1980. Esta correlación se basó en ensayos de laboratorio en el Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad del Oeste de Australia. La relación estaba representada por la ecuación 2.1:

$$\text{CBR} = 0.07 (\text{CIV})^2 \quad \text{Ec. 2.11}$$

Sin embargo el modelo más reciente fue el desarrollado por Al – Amoudi en el año 2002, en el cual se propuso el siguiente modelo con un coeficiente de correlación de 0.92.

$$\text{CBR} = 0.1691 (\text{CIV})^{1.695} \quad \text{Ec. 2.12}$$

2.2.5.2. Geogauge

El Geogauge de Humboldt es una herramienta manual portátil para evaluar el nivel de compactación, esta herramienta evalúa la calidad de cada capa compactada, de manera rápida, sencilla y sin interrumpir con la construcción, este evalúa la compactación de manera no destructiva, incluso cerca de equipos de vibración para obtener resultados de inmediato. La información puede ser bajada a una PC, para documentarla, archivarla o para los análisis adicionales, previniendo así inconvenientes en situ.

El geogauge puede ser aplicado en cualquier lugar que exista la necesidad de evaluar estructuralmente un material. El CBR puede ser estimado a partir de las mediciones del geogauge, donde el CBR está dado en porcentaje (%) y K_G es la rigidez en (MN/m) determinada por el geogauge, este instrumento trabaja con un coeficiente de correlación R_2 de 0.84 para todos los datos provistos.

$$\text{CBR} = 0.0039 (8.672K_G)^2 - 5.75 \quad \text{Ec. 2.13}$$

Esta ecuación fue establecida por el departamento de transporte de Luciana donde K_G es el valor de la rigidez que determina el geogauge para la cual la rigidez es dada de la relación que existe entre la fuerza y la deformación obtenida por la fuerza aplicada. Este principio se denota mediante la siguiente expresión.



$$F_{dr} = K_{flex} (X_2 - X_1) + \omega^2 m_{int} X_1 \quad \text{Ec. 2.14}$$

Luego el equipo procede a calcular la rigidez del suelo mediante la siguiente expresión:

$$K_{gr} = F_{dr} / X_1 \quad \text{Ec. 2.15}$$

Por lo tanto, la rigidez del suelo es:

$$K_{gr} = K_{flex} \frac{\sum_1^n \left(\frac{X_2 - X_1}{X_1} \right)}{n} + \frac{\sum_1^n \omega^2}{n} m_{int} \quad \text{Ec. 2.16} \quad \text{ó bien}$$

$$K_{gr} = K_{flex} \frac{\sum_1^n \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right)}{n} + \frac{\sum_1^n \omega^2}{n} m_{int} \quad \text{Ec. 2.17}$$

El GeoGauge tiene un peso estático suficiente para producir una tensión significativa sobre el terreno (es decir, 20,6 a 27,6 kPa (3 a 5 psi)), el GeoGauge tiene una precisión representada por un coeficiente de variación (COV) de típicamente 8,5% y el sesgo representado por un COV de <1%.

El geogauge muestra en la pantalla dos datos esenciales como lo es la rigidez (módulo de rigidez) y el módulo de Young (módulo de elasticidad), resultante de la fuerza impartida al suelo y la desviación resultante de la superficie, permite mediciones a una profundidad de 9 a 12" (2.30 a 3.10 metros). Este instrumento imparte muy pequeños desplazamientos al suelo, en 25 frecuencias estables entre 100 a 196 Hertz. Todo este proceso dura aproximadamente 75 segundos. Tomando en cuenta que los datos de módulo de rigidez y módulo de Young están dado según las siguientes expresiones:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Ec. (2.18) (Rigidez transversal o módulo de corte)}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ec. (2.19) (Módulo de Young o módulo de Elasticidad)}$$

Antes de usar el equipo es necesaria su calibración, para esto se hace uso de la base calibradora para garantizar su funcionamiento. La calibración del equipo



se hace de manera práctica y sencilla por lo que no amerita un técnico que lo realice, la base calibradora pesa aproximadamente 10 kg.

Para calibrar el equipo se coloca el geogauge en la base calibradora, a igual manera que en la superficie del terreno, este se rota para asegurar su estabilidad en la base calibradora, se toman de 3 a 5 lecturas, y los resultados deben de ser de $-9.3 \pm 5\%$, en otras palabras la rigidez de la base debe de andar en $(-8.8 \text{ a } -9.8) \text{ (N/m)}$ el signo negativo representa la masa. Una vez calibrado el equipo se puede proceder a utilizar el equipo en el Campo.

2.2.6. Suelos Cohesivos

(Juárez & Rico, 2007), las partículas gruesas están sometidas en su mayoría a fuerzas gravitatorias, por lo que presentan características similares; sin embargo existen partículas pequeñas con tamaños aproximados a las 2 micras (0.002mm) encargadas de mantener unión de estas partículas de mayor tamaño, a estas se les denomina limos o arcillas (esto corresponde a las características que presenten). Los suelos con alto contenido de arcilla se les denomina suelos arcillosos, estos presentan un alto índice de plasticidad por lo que sus partículas se mantienen unidas.

No obstante este tipo de suelos tiene en gran inconveniente en los procesos constructivos, debido a que al estar saturados tienden a disminuir en gran medida su capacidad de soporte (cortante), provocando el fenómeno conocido como asentamiento, que no es más que el hundimiento de las estructuras, de igual manera luego de perder humedad este se agrieta lo que debilita el soporte de los cimientos.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas.
- Arcilla en términos granulométrico, abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 0.075mm.



- Desde el punto de vista de la ingeniería una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica.

2.2.7. Variación Volumétrica.

Muchos suelos se expanden y se contraen debido a los cambios en su contenido de humedad. Las presiones de expansión se desarrollan debido a incrementos en la humedad, los cuales deben de ser controlados, ya que estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc.; por lo cual, es de suma importancia detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado a seguir para evitar dichos problemas.

2.2.7.1. Ensayo de Expansión o Hinchamiento

El objetivo de este ensayo es determinar el cambio en el volumen de un suelo dividido al aumento de la humedad, puede utilizarse el consolidómetro de expansión libre con anillo fijo según la norma ASTM D 4829-03; o bien utilizando anillo de sobrecarga de 10 lbs. Para dicho fin se utilizó la ecuación:

$$\%E = \frac{L_f - L_i}{127} \quad \text{Ec. 2.20}$$

2.3. Estabilización de Suelos.

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos. Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento con determinado aditivo transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables. Adicionalmente, el soporte estructural de los suelos estabilizados puede ser aprovechado en el diseño de pavimentos (Métodos de Estabilización de Suelos, 2010).

(Crespo, 2004), llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo



que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

2.3.1. Historia de la Estabilidad.

Desde sus inicios la humanidad se ha visto en la necesidad de transportar objetos como bienes propios, materiales e incluso el mismo ser, esto desde el periodo cavernario el hombre como tal ha emigrado en busca de mejores condiciones. Las rutas juegan un papel fundamental dado a que algunas no prestaban las condiciones para el transporte surgió la necesidad de modificar su estructura adecuándola a las condiciones que se requiriesen en ese entonces (Berry & Reid, 1993).

Datos históricos sitúan obras desde el imperio romano, en el cual de acuerdo a necesidades bélicas, se produjo la construcción de 70.000 km, esto durante el gobierno de Julio Cesar. En si este tipo de trabajo como tal constituía un tipo de estabilización física, ya que se procedía a compactar el suelo mediante el apisonamiento con esclavos y ganado lanar, posterior a este proceso se colocaban piedras labradas a mano como carpeta de rodadura; no obstante la intervención de agregados como los que se poseen en la actualidad no se presentaron en este proceso (Berrios & Chavarría, 2011).

2.3.2. Tipos de Estabilización

(Métodos de Estabilización de Suelos, 2010), las tres formas de lograrlo son las siguientes:

2.3.2.1. Estabilización Física

Este se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo por medio de mezclas de suelos, existen varios métodos como lo son:

- Geotextiles: son telas permeables no biodegradables que pueden emplearse como filtros y para controlar la erosión de suelos y el transporte de lodos



- Vibroflotación (Mecánica de Suelos): sirve para densificar suelos no cohesivos limpios. Por lo general el vibrador con el jet de agua reduce la fuerza intergranulares entre las partículas del suelo, permitiéndolas moverse a una posición más densa
- Consolidación Previa

2.3.2.2. Estabilización Química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

- Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Hule de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.



2.3.2.3. Estabilización Mecánica

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

- Compactación: este mejoramiento generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas.

2.4. Cal.

Es un término que designa todas las formas físicas en las que pueden aparecer el óxido de calcio (CaO) y el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 .

2.4.1. Antecedentes del Uso de la Cal.

El uso de agregados estaba ligado a la fabricación de mezclas de mortero, tal es el uso de la cal, un ejemplo de ello es la máscara de Jericó, una cubierta de cal pulida sobre una calavera que data del año 7000 A.C., estas técnicas antiguas fueron retomadas a su vez por los griegos y posteriormente los romanos. Estos no satisfechos buscaron implementar su uso en obras constructivas de alto nivel mezclando cal con suelos volcánicos, este fenómeno produjo obras de alto nivel y calidad aumentando la resistencia de los morteros significativamente (Ruiz, 2013).

La estabilización de la arcilla con cal en la construcción tiene más de 5.000 años de antigüedad. Las Pirámides de Shensi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal, en la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal, a medida que el tiempo paso la cal se volvió uno de los elementos más significativos, en la edad media tubo en descenso en cuanto a la calidad; sin embargo esto se debió a procesos de preparación como la cocción, mezclado y cremación. Posterior a esto, durante la introducción de la madera como elemento en la construcción, la cal fue implementada para la curación de la misma; evitando así daños por apollamiento y la proliferación del comején, plagas comunes la madera, a su vez servía como impermeabilizante para el agua y el sol (Ruiz, 2013).



2.4.2. Uso de la Cal en la Estabilización.

Fue en los EE.UU., a finales de 1940; cuando se aplicaron a las mezclas de cal y suelo las técnicas y ensayos de la mecánica de suelos que se desarrollaban en aquella época, el tratamiento de arcillas con cal comenzó en 1950, y la técnica aumentó su popularidad con gran rapidez. Se han construido miles de kilómetros de carreteras, así como aeropuertos principales como el de Dallas Fort Worth en EE.UU, sobre arcillas estabilizadas (Maldonado H. & Orellana A., 2009).

Esta técnica también se practica extensamente en Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Suecia, Guatemala y Francia. Desde entonces, la estabilización de los suelos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa económicamente beneficiosa a los métodos tradicionales de construcción.

En el Salvador, se pretende que la estabilización de suelos con cal sea una buena alternativa para caminos de baja intensidad vehicular, lo que podría disminuiría el déficit de recursos financieros en las municipalidades, Fondo de Conservación Vial (FOVIAL) y Ministerio de Obras Públicas (MOP). Existen diversos tramos de carreteras en los cuales se ha implementado la estabilización de los suelos con cal, uno de estos tramos donde se ha empleado esta alternativa es el que se realizó en el año 2001, en la carretera conocida con el nombre de “Anillo Periférico para la Asociación (Mancomunidad) La Montañona” ubicada en el Departamento de Chalatenango, teniendo esta como principal fin la conectividad de los sitios y municipios entre los cuales están: Concepción Quezaltepeque, Guarjila, Comalapa, La Laguna, Vainilla, El Carrizal, Ojos de Agua y las Vueltas entre otros (Maldonado H. & Orellana A., 2009).

Los porcentajes de cal utilizados en la estabilización del suelo que compone la subrasante de la carretera, estuvieron dentro del rango 3.5% a 5%, esto debido a la variación de plasticidad que presentaba el suelo del lugar, la información anterior fue proporcionada por el Ing. Felipe Siliezar (Planeamiento y Arquitectura S.A. de C.V). ANCADE (Asociación Nacional de fabricantes de Cales y Derivados de España), desde el año 1995 se dio a la tarea



de crear un departamento de asistencia técnica para la implementación de este tipo de aplicaciones.

En Nicaragua los estudios sobre este tipo de procesos constructivos son limitados, en gran medida por los gastos en los que se incurriría, no solo de dinero, sino también en el tiempo que se invertiría para su elaboración. Por lo general optamos por llevar los suelos a botaderos o usar mezclas de suelo con cemento, este proceso puede no ser el mejor e incluso accionar aún más pérdidas (Fletes, 2004).

2.5. Estabilización con Cal

La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas a temperaturas entre 880 y 900°C, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes. La adición de cal en los materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-base y bases, por sus diferentes reacciones, en mayor y menor grado, produce aumento en su límite líquido y mayor incremento en su límite plástico para generar así una disminución en su índice plástico; aumentando la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos y la resistencia a la compresión simple y el CBR.

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo. Una mínima cantidad de cal para tratamiento se utiliza para secar y modificar temporalmente los suelos. Tal tratamiento produce una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales. Un mayor grado de tratamiento, respaldado por las pruebas, diseño y las técnicas apropiadas de construcción, producen la estabilización estructural permanente del suelo (Álvarez & Echeverri, 1999).

Este es el objetivo sobre el cual se centre nuestro estudio ya que las pruebas y la metodología de diseño de capas de suelo estabilizadas están disponibles en muchos lugares, pero en nuestro país, este método de estabilización de suelos es muy poco usado, ya que esta técnica es relativamente nueva. Se debe tomar



en cuenta que el uso de cal para el secado de suelos, la modificación temporal y la estabilización permanente no está limitado a la construcción de carreteras.

La mayor parte de cal para el tratamiento de suelo, se usa en la construcción de carreteras. Sin embargo, el empleo de cal para el secado de suelos, la modificación temporal y la estabilización permanente no se limita a la construcción de carreteras, ahora mismo es un método práctico y económico para comunidades rurales que no cuentan con suficiente presupuesto para un proyecto de pavimentación, en base a esto es que hemos planteado su uso en la estabilización de los suelos de la comunidad San Isidro (El Pegón).

La estabilización con cal produce en el suelo un aumento de la resistencia al esfuerzo cortante, que aumenta con la proporción de cal utilizada, el tiempo transcurrido, la temperatura de curado y la disgregación que se haya conseguido del suelo. Por otro lado, también aumenta la humedad óptima de compactación, que permite que suelos de elevada humedad natural puedan conseguir una densificación adecuada, la densidad máxima Proctor de un suelo estabilizado con cal es inferior a la del suelo original, lo que no tiene gran importancia debido a las mejoras anteriores obtenidas con la estabilización (Gamica, Pérez, & Obil, 2002).

2.5.1. Características Físicas.

Finura.

Es una característica importante en la medida que interviene en las condiciones de almacenamiento, transporte y mezcla con el suelo. La hidratación de la cal viva con el agua produce la cal hidratada lo que lleva, además, una auto pulverización muy fina, incluso micronizada del producto. Además la finura puede intervenir en la reactividad de la cal.

Color.

Las cales comerciales tienen color blanco o débilmente gris, a veces un color rojizo debido al óxido de hierro que se encuentra en el yacimiento.



Densidad.

Esta propiedad depende de la temperatura de calcinación, cuando más alta es la temperatura de calcinación mayor será la densidad de la cal viva.

Dureza.

La dureza de las cales varía entre muy blandas y una dureza que se aproxima a la de la piedra original de donde se obtuvo, la dureza de la cal viva dependerá de la temperatura de calcinación.

Porosidad.

Depende del origen de la caliza y de las condiciones en que se lleve a cabo la calcinación. La porosidad en la cal viva es importante porque influye en la actividad química de la sustancia.

Plasticidad.

Es una propiedad física importante, la cual se define como la capacidad que posee una masa de cal para cambiar su forma cuando ésta es sometida a presión sin que se produzca la ruptura y para mantener la forma alterada.

2.5.2. Características y Propiedades Químicas de la Cal.

2.5.2.1. Características Químicas.

El contenido en óxido de calcio (CaO).

Es el componente fundamental de la cal. Puede estar, en forma de óxido CaO en las cales vivas, en forma de hidróxido Ca (OH)₂ en la cal hidratada.

El contenido en óxido de magnesio (MgO).

Es igualmente interesante, ya que el óxido de magnesio (MgO) posee en general una acción análoga a la del óxido de calcio (CaO). De igual manera puede estar en forma de óxido (MgO), o como hidróxido (Mg (OH)₂).



Reactividad de la cal viva.

Indica la velocidad o cinética de la reacción de hidratación. Es función de las características físicas y químicas del producto y depende de la porosidad de la cal, del grado de calcinación, de la materia prima (caliza) utilizada y de la finura de la cal en el momento del ensayo.

El ensayo más empleado y conocido se basa en el carácter exotérmico de la reacción entre el CaO y el H_2O , otros componentes minoritarios de las cales son los carbonatos cálcico y magnesio que se evalúan mediante el contenido de CO_2 de las cales.

2.5.2.2. Propiedades Químicas de la Cal.

Impureza.

La composición química y las propiedades de la cal, depende de la naturaleza y cantidad de impureza de la piedra original.

Reacción de la cal con agua.

La cal viva reacciona vigorosamente con el agua formando hidróxido de calcio y hay desprendimiento de calor; a este proceso se le conoce como hidratación o apagado de la cal. Utilizando la cantidad de agua exacta necesaria para la hidratación, se obtiene cal hidratada.

Recarbonatación.

La humedad del aire cataliza la reacción entre el óxido de calcio y el dióxido de carbono del aire. La reacción general se produce mediante la formación del hidróxido de calcio que luego reacciona con el dióxido de carbono.

2.5.3. Tipos de Cales usadas en la Estabilización.

Existen diversos tipos de cales usadas dentro del campo de la estabilización, estas contienen un sin número de características y se pueden clasificar de acuerdo a su origen, composición o tratamiento al cual fueron sometidas. En general se conocen tres divisiones:



- **Cal viva (óxido de calcio CaO):** se produce de la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza CaCO_3) en óxido de calcio.
- **Cal Hidratada (hidróxido de calcio $\text{Ca}[\text{OH}]_2$):** hidratada se obtiene cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua. La cal hidratada (hidróxido de calcio) es la que reacciona con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.
- **La lechada de cal;** es la suspensión de la cal hidratada en agua. Su empleo en tratamiento de suelo permite por un lado, evitar el polvo producido durante el extendido de cal y por otro, controla mejor la humedad de los suelos secos.

De acuerdo a su composición nace la siguiente clasificación:

- **Cal cálcica:** es aquella cuyo contenido en carbonato magnésico es inferior al 5%.
- **Cal dolomítica:** aquella que posee un contenido en carbonato magnésico entre el 5% y el 30%, ya que en porcentajes superiores no se contempla para trabajos de construcción.

Según la naturaleza de las cales, se establece la siguiente clasificación diferenciando las cales aéreas de las cales hidráulicas.

- **Cales aéreas:** aquellas que están constituidas principalmente por óxido o hidróxido cálcico y que tiene la propiedad de endurecerse mediante el contacto con el dióxido de carbono del aire.
- **Cales hidráulicas:** aquellas que se obtienen de la calcinación de calizas que contienen sílice y alúmina, las cuales confieren al aglomerante hidráulica.

La diferencia entre las primeras y las segundas radica en su contenido en elementos arcillosos, los cuales dan a las cales la capacidad de endurecer en contacto con el agua, es decir hidráulica.

Por otro lado, diferenciaremos las cales hidráulicas según si éstas deben su hidráulica a la composición natural de su materia prima o si se han obtenido

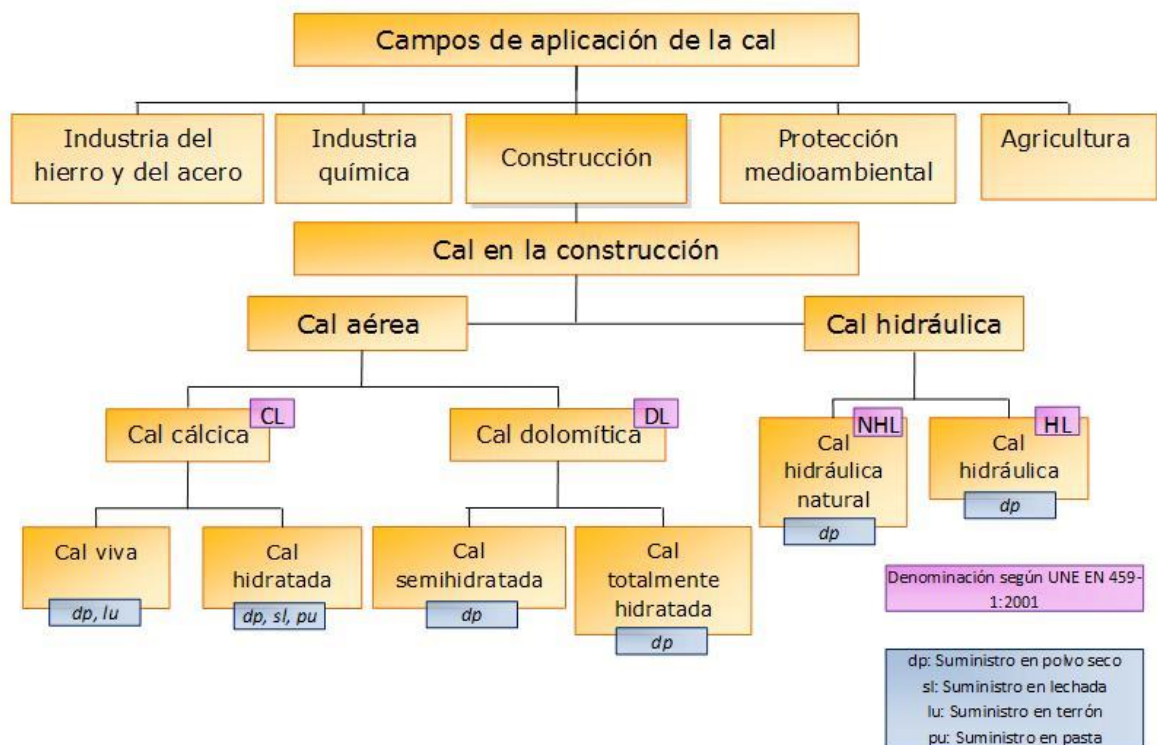


mediante la adición de componentes a la caliza de forma artificial, discriminando así las cales hidráulicas naturales (NHL) de las artificiales (HL).

2.5.3.1. Cales de Mayor Uso en la Estabilización y sus Efectos

Según la norma UNE EN 459-1, las cales de mayor uso en la estabilización

- Las cales altamente cálcicas producen menores resistencias que las que contienen cantidades apreciables de magnesio, pero presentan menores variaciones entre sí
- Las cales dolomíticas, si bien dan mayores resistencias, disminuyen menos la plasticidad de los suelos
- Las cales dolomíticas monohidratadas (donde el magnesio permanece como MgO) producen mejores resultados al estabilizar que las dihidratadas



Esquema 2.1. Tipos de cal y su uso, según la norma UNE EN 459-1, 2002.



2.5.4. Especificación Estándar Para la Cal Viva Y Cal Hidratada Para La Estabilización de Suelos.

ASTM C-977, esta norma ha sido aprobada para su uso por agencias del Departamento de Defensa, la especificación se refiere a la cal viva e hidratada cal, ya sea alta en calcio, dolomita, o cal magnesiano, para su uso en la estabilización de los suelos..

Según esta norma la cal usada en la estabilización debe cumplir con las siguientes especificaciones:

2.5.4.1. Composición química

- A menos que se especifique lo contrario, las definiciones de los términos utilizados en esta memoria descriptiva, se refieren a la terminología C 51.
- La cal viva y cal hidratada para la estabilización de suelos deberán cumplir con la siguiente composición química: calcio y magnesio óxidos (sobre una base no volátil, mínima%) 90,0 dióxido de carbono (tomada en el punto de fabricación, máximo%) 5,0 humedad libre (tomada en el punto de fabricación, máximo%) 2,0.

2.5.4.2. Propiedades físicas

- Cal hidratada, no deberán haber retenido más de 3% en un N ° 30 (590- μ m) de tamiz y no más de 25% retenido en un N ° 200 (75- μ m) de tamiz.
- La cal viva: tamaño de las partículas de cal viva-Cal viva vendrá toda aprobar una 1.0-in. (24.4 mm) de tamiz.
- La cal viva para la estabilización del suelo deberá tener una temperatura aumento de un mínimo de 30 ° C en 20 min, como se mide mediante el Ensayo Métodos C 110.
- Residuos de cal viva-cal viva para la estabilización de suelos no tiene residuo de más de 10% tal como se mide mediante el Ensayo Métodos C 110

2.5.5. Reacción Química de la Cal con la Arcilla.

La mezcla de cal con el suelo provoca reacciones rápidas que originan cambios físico-químicos producidos por cambios iónicos, neutralización y floculación. Las



finas partículas de arcilla se aglomeran en elementos más gruesos y friables. Estas reacciones se producen siempre que el suelo tenga un cierto porcentaje de finos, (Ver figuras 2.4 y 2.5).



Fig. 2.5: Suelo antes de ser estabilizado, fuente propia



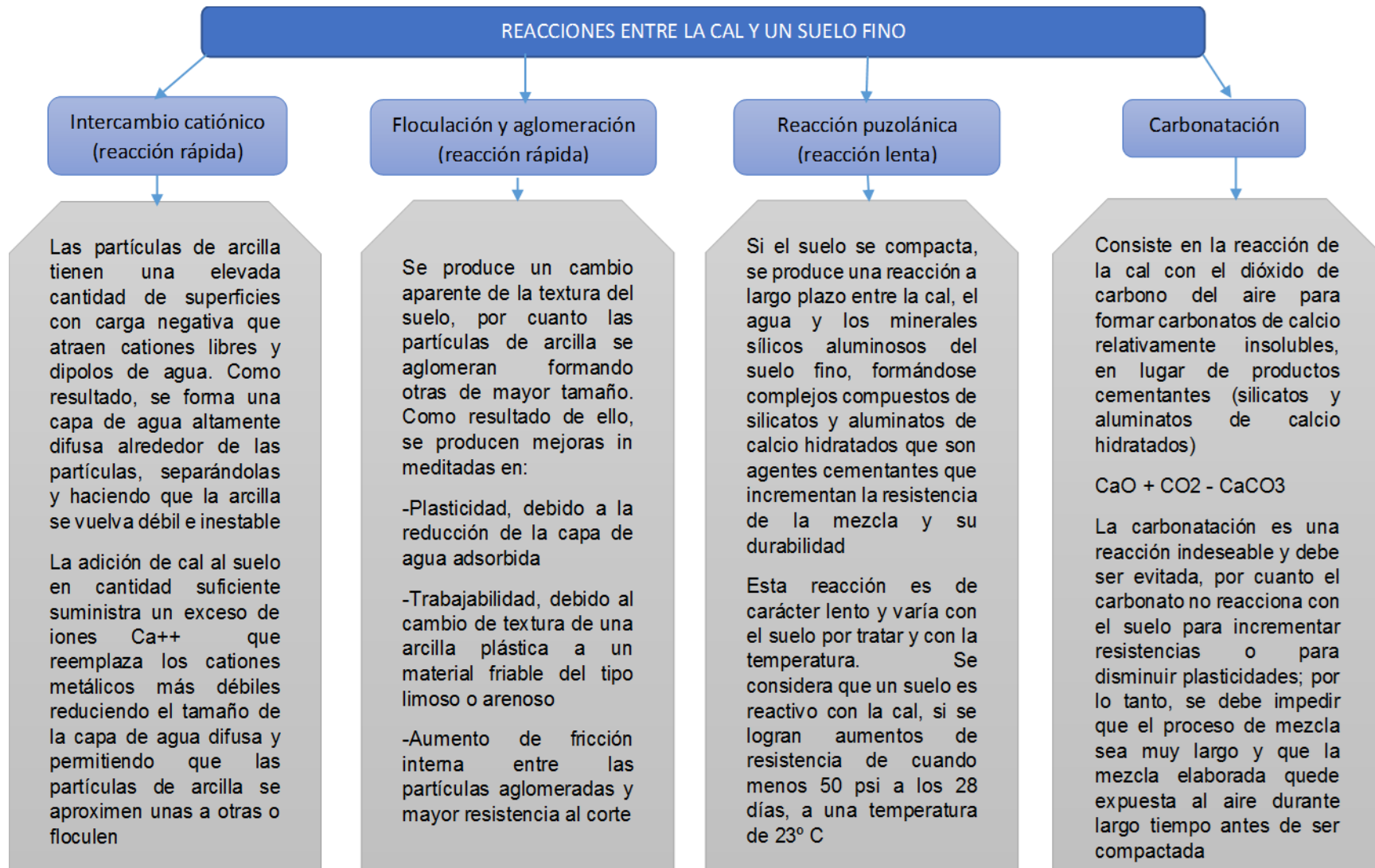
Fig. 2.6: Suelo luego de ser estabilizado, fuente propia

La mezcla de cal, arcilla y el agua genera una reacción exotérmica, los iones de calcio (Ca^{++}) de la cal se intercambian con las partículas de arcilla, con el agua y otros iones. Mediante la reacción exotérmica se evapora el exceso de humedad la que aumenta la resistencia y baja el índice de plasticidad a niveles moderados, por lo que se aprecia un cambio físico en las arcillas a un carácter más arenoso o granular, (Álvarez & Echeverri, 1999).

Al elevar la cal, el pH del suelo estabilizado aumenta hasta valores de 12.4%, se libera sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones calcio procedentes de la cal, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que, como en el caso de los cementos portland, incrementan la resistencia mecánica. Esta reacción de tipo puzolánica es progresiva con el tiempo y aumenta la impermeabilidad, la resistencia mecánica y la resistencia a las heladas del suelo tratado. Los porcentajes necesarios de cal para garantizar la permanencia de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre el 3 y el 8 por ciento.



Capítulo 2: Conceptos Fundamentales



Esquema 2.2 Reacciones de la Cal con el Suelo, Sanchez F., 2005



3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.

En este acápite se describen las características de mayor relevancia en la comunidad.

3.1. Localización.

La comunidad San Isidro se encuentra ubicada en el municipio de Potosí, en el departamento de Rivas, con latitud $11^{\circ}31'7''$ y longitud $85^{\circ}52'8''$ aproximadamente. Geográficamente limita al norte con la comunidad de Pica Pica, al sur con la comunidad de Potosí, este con la comunidad de Apompoas y al oeste con el municipio de Belén.

La superficie es de un aproximado de 6.33 km^2 equivalente al 4.31% de la superficie del municipio de Potosí. Al igual que el municipio, esta comunidad se encuentra ubicada en la planicie del istmo de Rivas (Alcaldía Municipal, 2010) (ver figura 3.1).

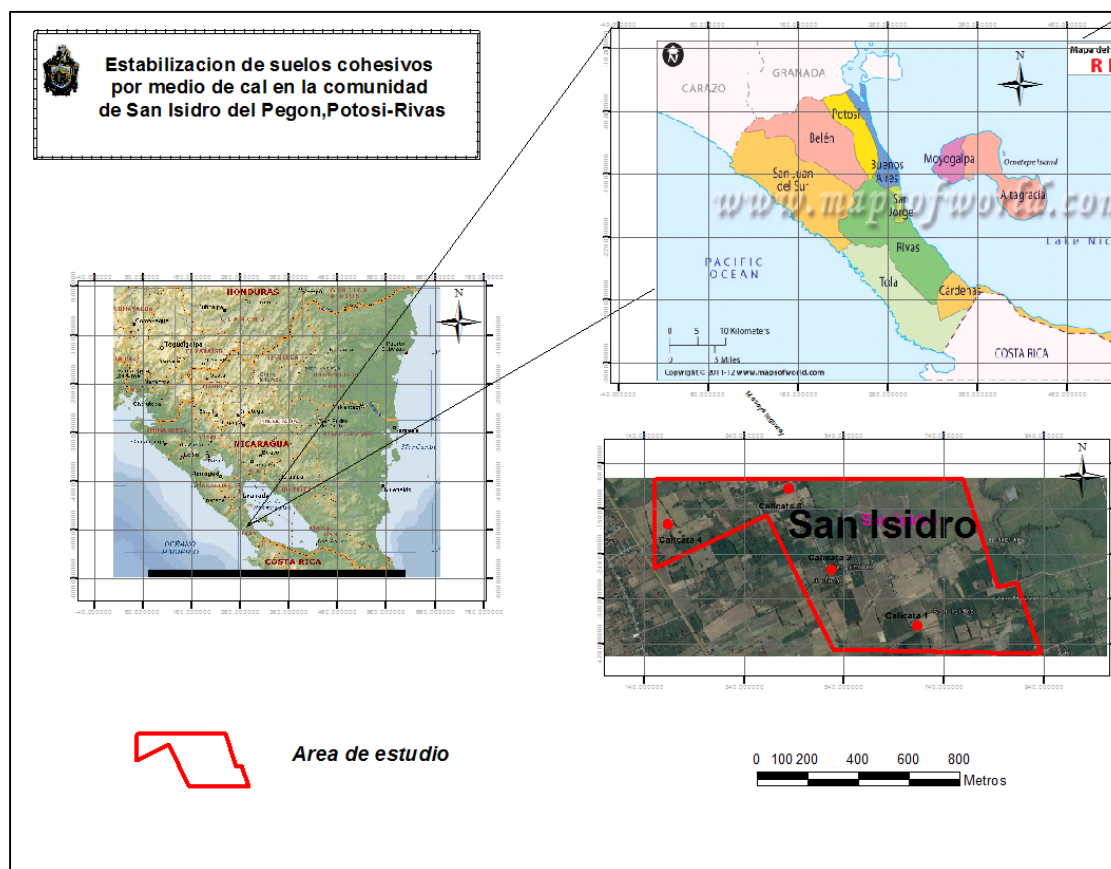


Fig. 3.1: Localización de la Comunidad San Isidro, (Modificado Arcgis)



3.2. Condiciones topográficas

Las condiciones topográficas de la comunidad son regulares, con elevaciones de 63 metros correspondientes a cota mayor y de 30 m la cota menor, con un tramo de 2.97 km de cota a cota, lo que equivale a un centímetro en variación de altura por cada metro de distancia. El desnivel del terreno natural se orienta en dirección noroeste a sureste (Alcaldía Municipal, 2010).

Algunos datos presentados en el párrafo anterior, fueron obtenidos a través de los software “Google Earth 2013 (georeferenciación y delimitación), Global Mapper v 15 (obtención de curvas de nivel) y AutoCad Civil 3D 2015 (análisis de cotas y perfil topográfico de la comunidad). Ver figuras 3.2 y 3.3.

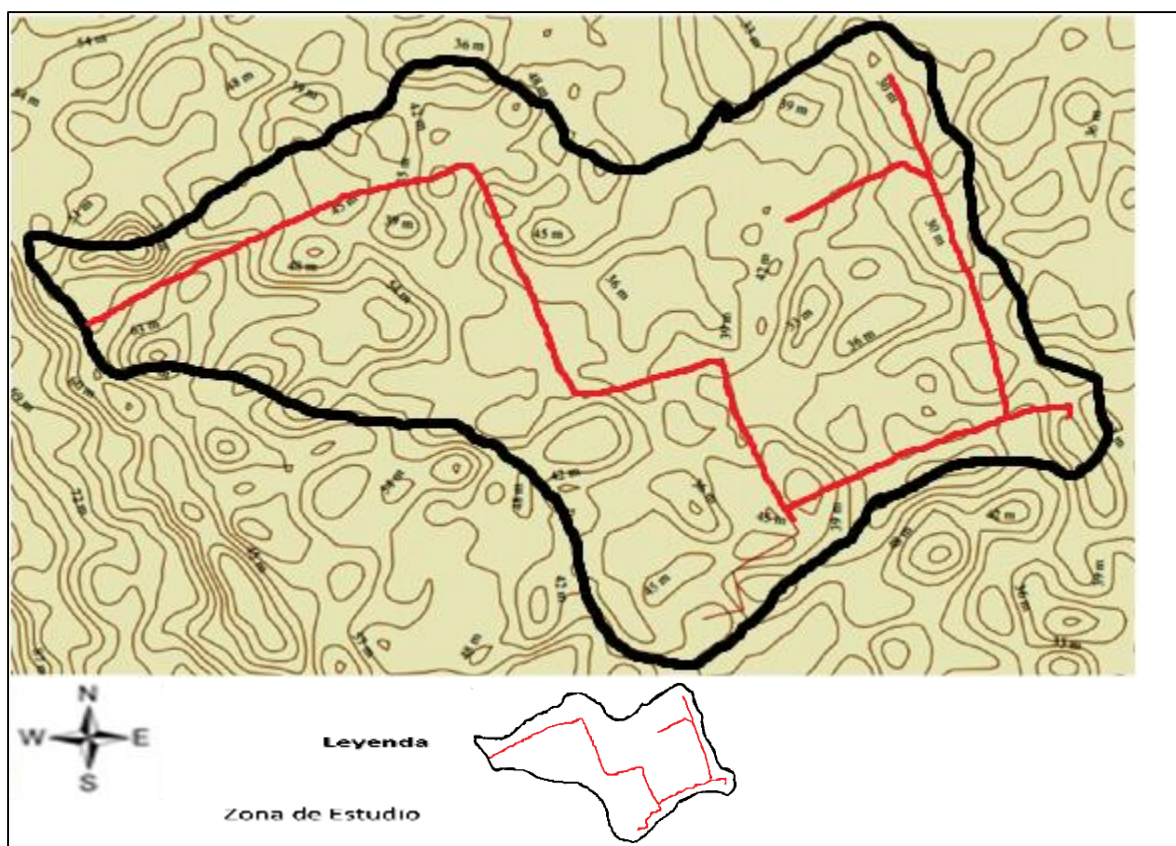


Fig. 3.2: Planta topográfica del terreno natural, modificado de Global Mapper v 15 y Google Earth 2013

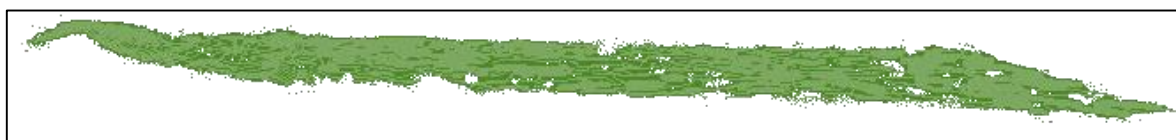


Fig. 3.3: Perfil topográfico del terreno natural, modificado de Global Mapper v 15



3.3. Historia de Inundaciones en el Área de Estudio.

La comunidad se localiza en la sub-cuenca del río Gil Gonzales la cual pertenece regionalmente a la cuenca de Río San Juan, que a su vez pertenece a la cuenca del lago Cocibolca. Sin embargo por ser el istmo de Rivas un terreno angosto, el clima está influenciado por los sistemas del Océano Pacífico, así como las condiciones de la Región Central del país (INETER, 1999).

INETER (2005) ha clasificado el clima del Pacífico de Nicaragua, como de SABANA TROPICAL (Aw), caracterizado principalmente por precipitaciones anuales que oscilan entre 1200 mm y 1600 mm. Abarca prácticamente toda la Región del Pacífico y las partes bajas e intermedias de la Región Central del país.

De manera anual pueden notarse algunas diferencias, en lo que los años más lluviosos están enmarcados dentro del fenómeno La Niña y los más secos durante el evento El Niño. La comunidad de San Isidro se caracteriza por ser una zona bastante regular, con baja incidencia a los desastres naturales, sin embargo se ha visto afectada por las intensas lluvias en fenómenos climáticos intensos. Entre estos el huracán Juana 1988 y el huracán Mitch 1998, periodo durante el cual esta comunidad estuvo prácticamente incomunicada (INETER, 2005).

Como se puede apreciar existe un desfase de 10 años en la ocurrencia de estos dos fenómenos, en estos periodos de tiempo no se tuvieron pérdidas humanas, sin embargo se volvió necesidad evacuar personas en la zonas más bajas de la comunidad. Consecuentemente a esto se vio la necesidad de reparar las vías, pero durante este proceso no se realizó ningún tipo de estudio.



Tabla 2.1. Resumen de la Precipitación Promedio. Estaciones del Área (INETER, 2005).

Estación / Período	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic	Acumulado Anual
CASUR 1994-2004	13.86	2.07	1.83	10.17	175.00	236.12	150.50	177.88	302.00	343.54	115.14	15.81	1543.93
RIVAS 1994-2004	15.93	4.74	1.95	6.45	165.45	212.80	155.94	162.86	313.24	296.27	120.59	22.31	1478.53
RIVAS 1969-2004	10.07	3.76	3.81	8.69	167.69	236.39	157.30	184.76	290.98	273.49	94.50	27.64	1459.09
RIVAS 1971-2000 NH	11.50	4.10	2.50	10.00	161.80	242.20	148.20	191.40	292.90	260.70	95.50	29.40	1450.30
MEDIA	12.84	3.67	2.52	8.83	167.48	231.88	152.99	179.22	299.78	293.50	106.44	23.79	1482.96

3.4. Región Geológica.

Según el Reglamento Nacional de la Construcción (RNC-2007) todo el departamento de Rivas y sus comunidades, se encuentran ubicadas en la zona sísmica C. Una zona con gran incidencia sísmica, prácticamente la mayor en nuestro país.

A demás de estar ubicada en la cordillera volcánica del pacifico; no obstante la comunidad San Isidro, no ha sido afectada potencialmente ante fenómenos sísmicos, pero si por efectos de emisiones de gases y cenizas producto de la actividad en el volcán Concepción durante el año 2005 (INETER 2002).

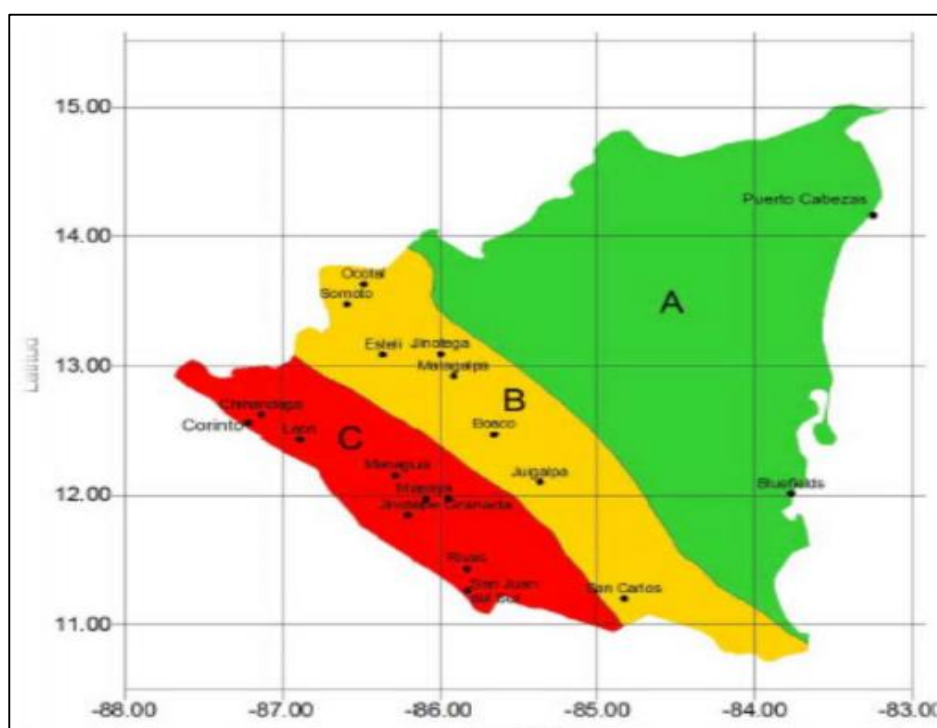


Fig. 3.4: Zonificación Sísmica de Nicaragua, fuente RCN - 2005



3.5. Descripción Geológica de la Estratigrafía de la Comunidad.

3.5.1. Basamento.

INIFOM (1997) realizó un estudio donde muestra que el área está compuesta por rocas sedimentarias del Cretácico agrupadas en la formación Rivas y los sedimentos acumulados del cuaternario se evidencian en la conformación de los suelos de la comunidad. Estas rocas datan del cretáceo superior, conformada por sedimentos marinos clásticos como arenisca turbidítica y lutitas, margas, calizas que son interrumpidos por rocas ígneas del tipo dioritas.

3.5.2. Capas superficiales.

En el área de estudio se observa un afloramiento de hasta 3 metros de espesor, compuesto especialmente de arenisca y lutita, de igual manera se observa un fuerte fracturamiento de las rocas sedimentarias. Sedimentos del cuaternario formados por acumulaciones de arena, arcilla y limo, del arrastre de materiales sueltos provocados por las corrientes fluviales especialmente, son evidentes en la parte superior de la zona, los que se extienden en unos 4 metros de profundidad (figura 3.5).



Fig. 3.5: Fotografía del comportamiento de suelos en la comunidad San Isidro, fuente propia



Herrera & Ortiz (2013) muestran la composición de los suelos de las capas superiores de acuerdo al orden y el área abarcada corresponden a: vertisoles 63.68%, molisoles 16.85%, inceptisoles 14.64%, entisoles 2.64% y alfisoles 2.19%.

3.6. Características de las Vías.

En la comunidad existen dos rutas de acceso la ruta Potosí-San Isidro-Km 100, la cual tiene una longitud de 5.05 km y la ruta de acceso Apompoas-San Isidro, con una longitud de 1.33 km. La extensión total de la vía es de 8.68 km (datos tomados mediante el software Google Earth), los cuales son de carácter rural y consta de una carpeta de rodadura, a base de un recubrimiento de cascajo (lutita) (Alcaldía Municipal, 2010).

No obstante solo la parte correspondiente a la ruta utilizada por la empresa azucarera CASUR recibe un tratamiento periódico, para el tráfico de vehículos pesados. Sin embargo durante la temporada de invierno y los efectos de suelos se evidencian los daños sobre las vías, dificultando el tráfico significativamente. Ver figura 2.5 (Fotografías 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).

3.6.1. Estudios Previos.

La información existente acerca de estudios realizados en la comunidad son limitados, ya que gran parte de ello son de carácter privado y enfocado a la agricultura; siendo Casur, la empresa azucarera la que se ha encargado de llevarlos a cabo. Entre esto se encuentran:

- Estudios topográficos (1975): este estudio sirvió de base para la creación del sistema de riego usado en la actualidad, el cual no es más que un canal artificial que drena agua del lago Cocibolca y se extiende a lo largo de las propiedades pertenecientes a esta empresa.
- Estudios topográficos (1992): realizado con el objetivo de nivelar para la creación de riego por gravedad en las parcelas de caña.

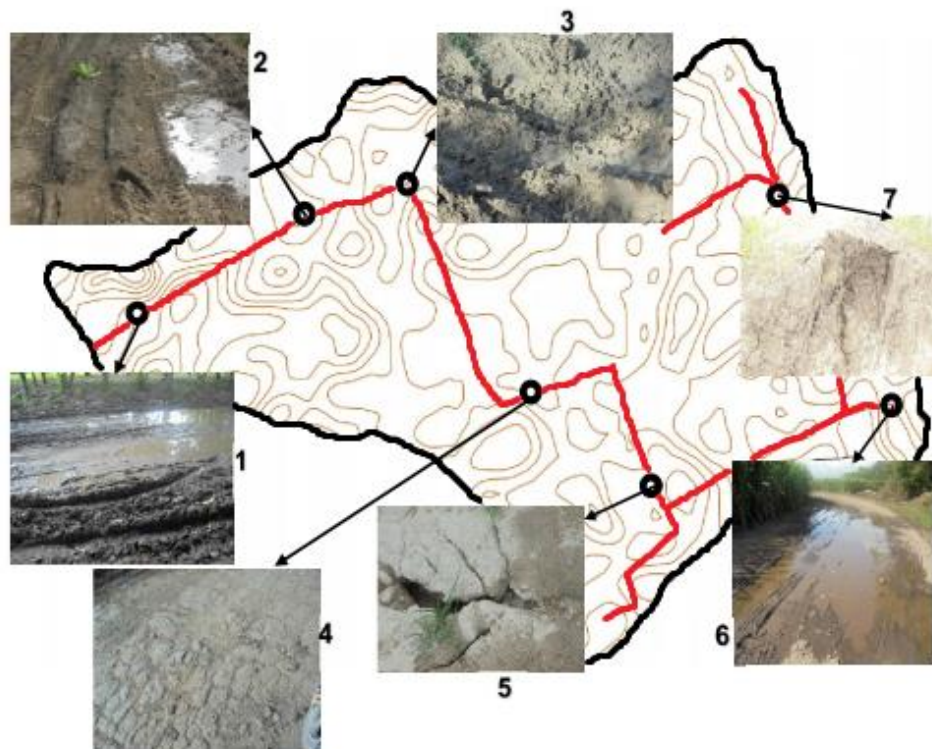


Fig. 2.5: Situación Actual de las Vías, Modificado AutoCAD Civil 3D 2015

- Fotografía 1: Acceso principal carretera panamericana - comunidad San Isidro.
- Fotografía 2: Condición actual tramo paralelo a la finca Las Brisas
- Fotografía 3: Primera intersección, frente a los pozos de ENACAL de la comunidad San Isidro.
- Fotografía 4: Contiguo a la intersección localizada frente al colegio de la comunidad San Isidro.
- Fotografía 5: Condición actual frente intersección contiguo al basurero municipal.
- Fotografía 6: Intersección comunidad Apompoas-San Isidro, contigua al canal de riego de la empresa CASUR.
- Fotografía 7: Intersección zona cañera empresa CASUR.



4. DISEÑO METODOLÓGICO.

4.1. Etapa 1: Recopilación de información, exploración y evaluación de los puntos críticos de las vías.

En esta etapa se recopiló y seleccionó toda la documentación existente concerniente a las características y datos de la comunidad San Isidro, procesos de estabilización y normativas para la realización de los estudios descritos. Dicha documentación sirvió de base para organizar el trabajo de campo y laboratorio.

4.2. Etapa 2: Muestreo de suelos

En esta se realizó el muestreo de los suelos de la comunidad “San Isidro”, ubicado en el municipio de Potosí, Rivas, mediante la realización de calicatas de un metro cuadrado y con profundidades que varían en 1-2 metros.

4.3. Etapa 3: Análisis de Laboratorio

Las muestras se sometieron a un análisis y así fueron caracterizadas siguiendo los procedimientos descritos en las normas ASTM, revisión anual 2007, (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1: Ensayos de laboratorio a los que se sometieron las muestras.

Parámetro	Norma
Determinación en laboratorio del contenido de agua de los suelos, roca y mezclas de suelo agregado	ASTM D-2216
Determinación de la gravedad específica de los suelos	ASTM D-854; AASHTO T 93-86
Determinación del análisis granulométrico de los suelos (Método Mecánico)	ASTM D-422; AASHTO T 27-88
Análisis granulométrico por medio del hidrómetro ASTM. D 422.	ASTM. D 422; AASHTO T 88.
Determinación de los límites de consistencia o de Atterberg de los suelos	ASTM D 4318; AASHTO T 89-90 y T 90-87
Prueba de compactación de suelos Proctor estándar.	ASTM D698-91
Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de suelos compactados en el laboratorio	(ASTM D 1883

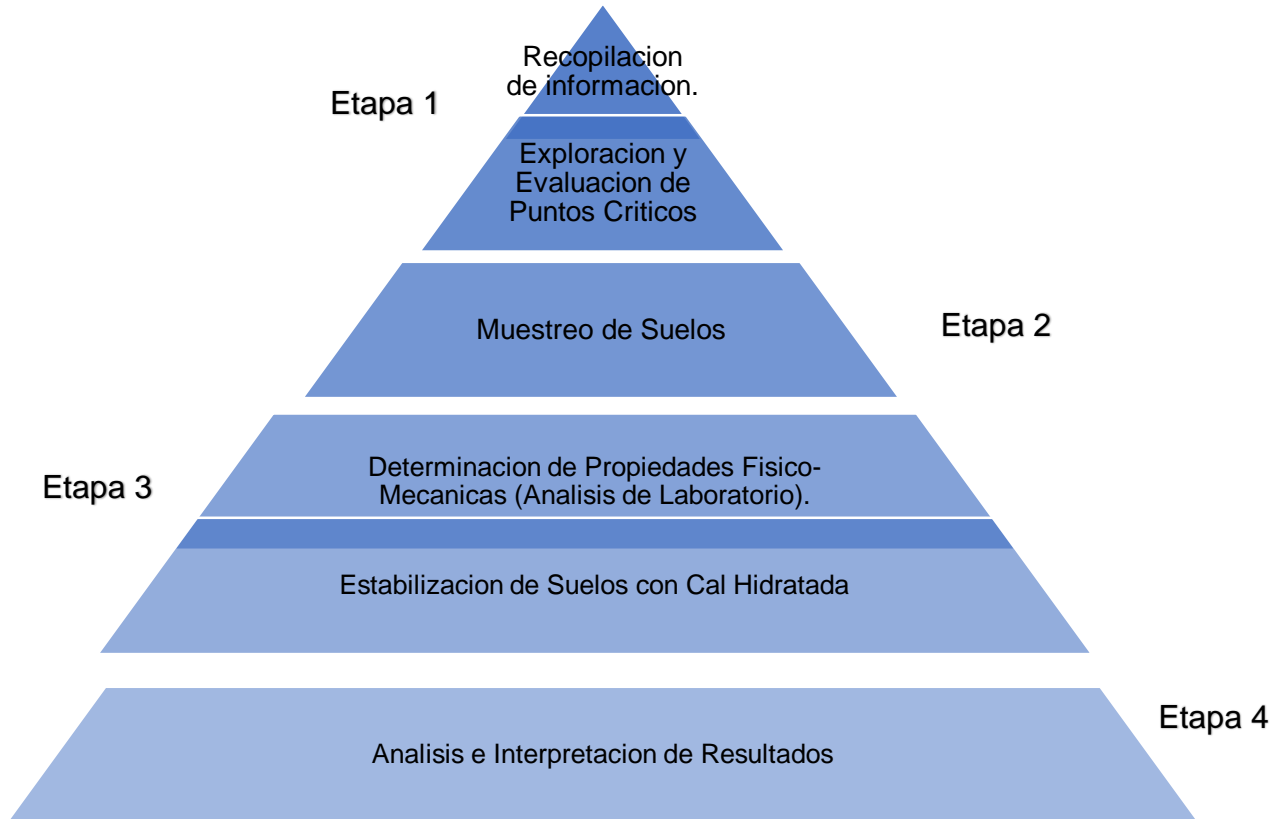


4.4. Etapa 4: Estabilización de Suelos Cohesivos con Cal.

Luego de determinar las características y clasificar los suelos se realizó una correlación, para posteriormente ser sometidos a la estabilización con cal.

4.5. Análisis e Interpretación de resultados.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis manuales y con ayuda de software (Microsoft Excel 2013), para obtener las características de los suelos de la comunidad, clasificarlos según el método HRB, proponer concentraciones o porcentajes de cal para su estabilización, comparar las condiciones de suelos sin estabilizar con suelo ya estabilizado y obtener porcentajes óptimos de cal para la estabilización de los suelos cohesivos de esta comunidad.



Esquema 4.1. Metodología Implementada, Elaboración propia.



5. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS, EQUIPO Y PRUEBAS REALIZADAS.

A continuación se presenta la metodología empleada para el desarrollo del estudio, de igual forma se describen los procesos puestos en práctica, así como la descripción de los equipos utilizados.

5.1. Recolección y muestreo de los suelos en la zona de estudio.

Se realizaron 10 calicatas con un área de 1 m², de estas 6 constan de una profundidad de 1 metro y las otras cuatro a una profundidad de 2 metros. El objetivo de las 6 calicatas de poca profundidad fue constatar que el suelo en estudio poseía las mismas características físicas que las muestras encontradas en las calicatas de mayor profundidad.

En dichas calicatas se determinó la predominancia de los cuatro suelos que posteriormente fueron ensayados. Las calicatas se realizaron en los extremos de la sección transversal de la vía; sin embargo estos se enfocaron en las zonas de mayor afectación y donde existe presencia puntos obligados (escuela de la comunidad, pozos de ENACAL, basurero municipal y puntos de acceso a la comunidad).

5.2. Caracterización de los suelos.

Posteríos a la recolección se procede a describir el proceso utilizado en la elaboración de nuestro estudio, basándonos en las normas ASTM y AASHTO. Estos estudios sirvieron para llevar a cabo la clasificación de las muestras de suelo.

5.2.1. Propiedades Índice.

En la tabla 4.1 se describen brevemente el proceso y los equipos utilizados para la determinación de las propiedades índice de las muestras obtenidas de los sondeos manuales.



Tabla 4.1: descripción del proceso y los equipos utilizados

Propiedad	Norma	Equipo	Proceso
Contenido de humedad	ASTM D-2216	<ul style="list-style-type: none"> - Tara - Horno - Balanza (0.01gr) 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación de muestras - Peso de muestras húmedas - Colocación en horno - Peso de muestras secas
Gravedad específica	ASTM D-854; AASHTO T 93-86	<ul style="list-style-type: none"> - Tara - Tamiz # 40 - Bomba de succión - Balanza (0.01gr) - Probeta - Termómetro de mercurio 	<ul style="list-style-type: none"> - Tamizado de muestra - Peso de 60gr de muestra seca - Peso de la probeta con agua - Succión del aire en agua - Colocación de la muestra en la probeta - Succión del aire en la mezcla. - Toma de temperatura
Análisis granulométrico	ASTM D-422; AASHTO T 27-88	<ul style="list-style-type: none"> - Trituradora - Bandejas - Tamices - Taras - Balanza - Horno 	<ul style="list-style-type: none"> - El material ensayado fue disgregado con la trituradora - Peso de 200 gr de suelo - Lavado del material por la tamiz #200 - Secado del material por 24 hr - Tamizado - Peso de material retenido en los tamices
Análisis granulométrico por medio del hidrómetro	ASTM. D 422; AASHTO T 88.	<ul style="list-style-type: none"> - Tamiz #200 - Tasa de porcelana - Solución de hexametafosfato de sodio y agua destilada - Juego de Probetas - Balanza - Taras - Pipeta - Agitador eléctrico y vaso - Destilador de agua - Espátulas - Hidrómetro 151H 	<ul style="list-style-type: none"> - Destilación de agua - Preparación de la mezcla de agua destilada (250 ml) y hexametafosfato (1gr) de sodio - Tamizado de suelo - Saturación de la 50 gr de suelo y 125 ml de solución por 24 horas - Agitado del material - Colocación de la mezcla y llenado de la probeta hasta 1000 ml - Toma de lecturas y temperaturas a diferentes intervalos tiempos

Capítulo 5: Descripción de las Muestras, Equipo y Pruebas Realizadas



		- Termómetro de mercurio	
Determinación de los límites de consistencia o de Atterberg de los suelos	ASTM D 4318; AASHTO T 89-90 y T 90-87	<ul style="list-style-type: none"> - Taras - Tamiz #40 - Tasa de porcelana - Balanza - Pipeta - Espátula - Copa de Casa Grande automática - Ranurador - Palca de cristal 	<ul style="list-style-type: none"> - Tamizado de las muestras de suelos - Pesado de 200 gr de suelo - Mesclado de material con agua - Colocación del material en la copa de casa grande - Conteo de numero de golpes - Se realizaron cuatro repeticiones para cada suelo precaviendo tener lecturas por encima de 25 golpes y por debajo de los 25 golpes - Realización de rollitos de 3 mm de diámetro - Pesado de materiales húmedos en ambos ensayo - Secado en horno por 24 hr. - Peso de material seco

Con los datos obtenidos determinamos se determinó la clasificación para cada suelo ensayado, dicha clasificación se la base para realizar la estabilización de las muestras con distintas dosificaciones de cal (ver tabla 4.2).

Tabla 4.2: Identificación de las muestras de suelo en la comunidad San Isidro.

Identificación de Suelos									
Calicatas	C1	C2			C3		C4		
Muestras	M1	M1	M2	M3	M1	M2	M1	M2	M3
ID	Correlación 1	Est1-Cal2	Correlación 1	Correlación 2	Est1-Cal3	Correlación 3	Est1-Cal4	Correlación 3	Correlación 2



5.2.2. Pruebas de Resistencia

Entre las pruebas que abordaremos se encuentran la de compactación Proctor Estándar, la de capacidad de carga o CBR y la de cambio de volumen con respecto al aumento de humedad o hinchamiento. Ya que con anterioridad se determinó que el suelo estudiado corresponde a la clasificación A-7-6, se realizó la mezcla de dichas muestras.

Para homogenizar la mezcla de los suelos se utilizó de la “máquina de los ángeles”, se tomaron porciones de suelos iguales y las concentraciones de cal variadas a una razón de 50 vueltas en la maquina (ver figuras 4.1 y 4.2).



Fig. 4.1: fotografía Máquina de los Ángeles, fuente propia



Fig. 4.2: fotografía Colocación de suelos, fuente propia



Fig. 4.3: fotografías de suelos usados en la estabilización, fuente propia

Luego de mezclar los suelos se realizaron las pruebas anteriormente mencionadas. Para ello se hizo uso de equipo especializado y dichas pruebas sirvieron para determinar cada una de las características antes mencionadas de forma indirecta. A continuación procedemos a describir primeramente el equipo utilizado y luego el procedimiento aplicado.

5.2.2.1. Prueba de Compactación (Proctor Estándar).

De conformidad a las normas establecidas por la ASTM D698-91; AASHTO T 99-99, se desarrolló el ensayo de Proctor Estándar, el cual se describe a continuación.



Equipo utilizado:



Fig. 4.4: fotografías de los equipos utilizados, fuente propia

A través del ensayo de compactación Proctor estándar se determinó humedad óptima y densidad seca máxima del suelo seleccionado para el ensayo. En la figura 4.4 se muestra el equipo utilizado en el ensayo Proctor Estándar.

Procedimiento:

- Una vez homogenizada la mezcla de los suelos, se tomó una muestra representativa de 5 kg.
- Recolección de los datos del molde de compactación.



- c) Con la muestra completamente seca se agregó agua, en diferentes proporciones.
- d) Compactación de la muestra en 3 capas con 25 golpes para cada una según las normas ASTM.
- e) Luego de con la muestra compactada se tomó el peso del cilindro más la muestra.
- f) Extracción de la muestra por medio de la gata hidráulica y se tomaron muestras representativas para constatar la humedad presente.
- g) Colocación de muestras en el horno por 24 horas a 110 °C.
- h) Pesado de la muestra representativa seca.



Fig. 4.5: fotografías del procedimiento utilizado, fuente propia



5.2.2.2. *Pruebas de Capacidad de Carga.*

En este ensayo comúnmente se mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 plg². De área en una muestra de suelo de 6 plg. (15 cm) de diámetro y 5 plg. (12.5 cm) de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min (0.5 plg./min). La fuerza necesaria para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada, (ASTM D-1883; 2007).

Nosotros nos enfocamos en realizar dicha prueba con dos métodos indirectos el del impacto de CLEGG y Geogauge, a continuación describiremos tanto equipos como procedimientos utilizados.

5.2.2.2.1. *CBR con Geogauge*

El geogauge muestra en la pantalla dos datos esenciales como lo es la rigidez (módulo de rigidez) y el módulo de Young (módulo de elasticidad), resultante de la fuerza impartida al suelo y la desviación resultante de la superficie. Este instrumento imparte muy pequeños desplazamientos al suelo, en 25 frecuencias estables entre 100 a 196 hertz. Todo este proceso dura aproximadamente 75 segundos, (ver figura 4.6).

Especificaciones técnicas del Geogauge H4140.

- Cumple con las normas ASTM D – 6758
- Panel de pantalla: pantalla LCD con teclado de funciones de membrana y puerto de comunicación infrarrojo.
- Rango de rigidez de 3 a 70 MN/m
- Rango de módulo de Young de 26 a 610 MPa
- Rango de medición de profundidad de 9' a 12'
- Temperatura de operación de 0°C a 58°C temperatura ambiente
- Fuente de poder: 6 baterías alcalinas de 1.5 voltios, alcanza de 1,000 a 1,500 mediciones.



- Peso de 22 lbs (10 kg)
- Vibración $< 1.27 \times 10^{-6} \text{m}$ ($< 0.0005 \text{ in.}$) @ 125 Hz.



Figura 4.6 Fotografías “Humboldt Geogauge”, fuente propia

Procedimiento de Desarrollado

- a) Con los datos de humedad óptima obtenidos en el ensayo Proctor estándar se proceda preparar la muestra.
- b) Determinación de peso seco, para obtener la cantidad de agua necesaria y así llegar a la humedad óptima.
- c) Adición de agua y se homogenizo la mezcla.
- d) Compactación de suelos en tres capas de igual espesor con 75 golpes (esto se debe a que el área del molde utilizado corresponde a tres veces el área del molde de compactación Proctor estándar).
- e) Calibración del equipo en la placa o base de calibración.
- f) Toma de lecturas 5 mediciones con el geogauge (se tomaron datos de Esfuerzo y módulo de Young).

Nota: el geogauge realiza cinco mediciones en cada lectura que toma y el dato presentado por el mismo, es el promedio de las mediciones; por tanto se tomaron



5 lecturas para cada muestra con el equipo, lo que corresponden a 25 mediciones.

5.2.2.2.2. CBR con Martillo de Clegg

El martillo Clegg está basado en la instrumentación del martillo de compactación de laboratorio “Proctor modificado”, el martillo tiene un peso de 4.5 kg con un diámetro de 5 cm y se deja caer desde una altura estándar de 45 cm. Este instrumento está provisto de un acelerómetro piezoeléctrico que genera una lectura digital basada en la desaceleración pico del martillo al caer.

El valor que registra dicho acelerómetro se le conoce como Valor de Impacto Clegg (VIC) (1 VIC equivale a 10 gravedades). La lectura del VIC registrada al cuarto o quinto golpe es el valor estándar típicamente recomendado, debido a que los valores de éste comienzan a estabilizarse en ese golpe (Clegg, 1986).

Especificaciones del Martillo Clegg modelo H - 4190:

- Martillo Estándar de 4.5 kg (10 libras) con bolsa de lona
- Cara de impacto de acero templado provisto de un acelerómetro piezoeléctrico.
- Construcción del martillo: Acero.
- Tubo guía grueso y con pasador de bloqueo fijado con cadena.
- Dimensiones del tubo de 610 mm altura x 152.4 mm diámetro de base (24"x6").
- Pantalla digital con batería alcalina de 9 Voltios, resolución de 1 CIV (10 gravedades); escala CIV de 0 a 100.
- Peso neto de 7.2kg (16lbs).
- Cumple con la norma ASTM D – 5874.

En la figura 4.7 se muestra el martillo de clegg utilizado para la determinación del CBR de la mezcla de suelo ensayado.



Figura 4.7 Fotografías “Martillo de Clegg (VIC)”, fuente propia

Procedimiento Desarrollado

Para llevar a cabo este ensayo se realizaron los pasos de la “a-e” que se hicieron en con el geogauge. Luego se procedió a golpear el material con el martillo de Clegg.

Ambas pruebas se realizaron en paralelo, puesto que los pasos eran los mismos, primero se tomaron lecturas con un equipo y luego con el otro. El fin de realizar ambos ensayos fue para obtener datos más exactos y corroborar alguna diferencia entre ambos métodos.

A continuación se muestran las figura 4.8 y 4.9 en las cuales se describe de forma precisa el procedimiento desarrollado.



Figura 4.8 Fotografías “Preparación de las muestras”, fuente propia



Figura 4.9 Fotografías “uso del geogauge y el Martillo de Clegg”, fuente propia



5.2.3. Ensayo de Expansión (Prueba de Hinchamiento)

La prueba de expansión es propia de suelos cohesivos, ya que es una de las características principales de estos, en laboratorio la determinamos de manera sencilla. Para ello se hizo uso del siguiente equipo:



Figura 4.10 Fotografías “Equipo para prueba de Expansión”, fuente propia

Procedimiento desarrollado:

- Una vez determinada la humedad óptima se procede a determinar la cantidad de agua necesaria.
- Mezclar la muestra con agua hasta homogenizar
- Se repite el proceso de compactación.
- Se colocan los discos de sobrecarga y se marca la altura correspondiente.
- Se colocan en el contenedor y se llenan con agua.
- Se dejan saturando por 72 horas.
- Se sacan del contenedor y se toma la altura nuevamente.
- Se procede a determinar el porcentaje de expansión.



Figura 4.11 Fotografías “Descripción del procedimiento desarrollado”, fuente propia

5.3. Estabilización de Suelos Con Cal Hidratada.

Antes de realizar la estabilización de los suelos de la comunidad San Isidro, fue necesario determinar parámetros básicos, obtener un tipo de cal específico y aún más importante las características y propiedades de la misma. Gracias al apoyo del señor Víctor Manuel Sánchez gerente de la empresa PROCAL quien nos facilitó datos de laboratorio realizados a muestras procedentes de la caliza “Mina el Diamante”.

Estas muestras fueron analizadas el día 6 de marzo del 2014, en los laboratorios Medico-Químicos Dr. Bengoechea S.A, estos datos solo muestras propiedades y características químicas; estas se muestran en la tabla 4.4



5.3.1. Características y Propiedades de la Cal Utilizada en la Estabilización

Tabla 4.4 características y propiedades de la cal, lab. Bengoechea, marzo 2014

Características y Propiedades	Porcentaje
Humedad (100-105)°C*4 horas	0.31 %
Índice alcalino como CaO	0.29 %
Perdidas por Calcinación (PPC)	28.34 %
Oxido de Calcio (CaO)	52.45 %
Oxido de Magnesio (MgO)	4.98 %
Trióxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	0.96 %
Trióxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.34 %
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	0.06 %
Insolubles totales en ácido Clorhídrico	2.38 %
Otro	10.49 %
Total	100 %

5.3.2. Análisis de los Materiales a Utilizar en una Estabilización De Suelos Con Cal.

5.3.2.1. Suelo.

Los suelos que componen la mezcla suelo – cal deben ser del propio camino o provenir, en todo o en parte, de préstamos seleccionados. Los sitios de préstamo deberán contar con suelos que cumplan con las propiedades requeridas por las normas AASHTO y ASTM para formar parte de la estructura de un pavimento.



Los suelos que se usen para la elaboración de mezcla suelo-cal deben estar limpios y recomendable que estos no deban tener más de uno por ciento (1%) de su peso de materia orgánica. Además la fracción del suelo que pasa la malla No 40 debe tener un índice de plasticidad no menor de 10. El tamaño máximo del agregado grueso que contenga el suelo no debe ser mayor de 50 mm o 1/3 del espesor de la capa compactada de suelo-cal. El espesor total de la capa de suelo estabilizado con cal, será variable según se especifique en el proyecto.

5.3.2.2. Cal.

La cal que se use para la construcción de suelo-cal puede ser cal viva o cal hidratada y debe satisfacer los requisitos establecidos bajo las especificaciones de la norma ASTM C-977.

De acuerdo a la composición de la cal utilizada en el proceso es cálcica debido al que su contenido de magnesio es menor al 5%, que a su vez corresponde a cales hidratadas debido al proceso de calcinación de la misma.

5.3.2.3. Agua.

El agua que se use para la construcción de mezcla suelo – cal debe estar limpia, no debe contener materia orgánica y debe estar libre de sales, aceites, ácidos y álcalis perjudiciales.

5.3.3. Mezcla suelo-cal.

Los ensayos para determinar el porcentaje de cal y los demás requisitos que debe satisfacer la mezcla de suelo-cal deben ser ejecutados con los materiales que se vayan a usar, incluyendo el agua de mezclado, de acuerdo a la norma ASTM D 6276 (Método de ensayo estándar, usando el pH para estimar la proporción suelo-cal requerida para la estabilización de suelos).

El porcentaje óptimo de cal requerido en la estabilización del suelo, se determina mediante la estimación del pH, o determinando el índice de plasticidad más bajo requerido, como resultado de varias mezclas de suelo-cal con diferentes porcentajes de cal, respecto al peso seco del suelo.



Cuando la mezcla de suelo-cal se use para la construcción de capas estructurales debe tener los valores C.B.R. requeridos. Se deberá mostrar una fórmula de trabajo, donde se indique las cantidades y tipo de cal, el volumen de agua y los procesos que se deben seguir para obtener los requerimientos estructurales solicitados.

5.3.4. Propiedades Modificadas en la Estabilización.

El enfoque del estudio va dirigida a la reducción del índice de plasticidad del suelo, mayor densificación al igual que aumentó de humedad optima requerida en el proceso de compactación y aumento del C.B.R.; no se realizó en base al pH debido a la complejidad para determinar esta propiedad. Por ende los estudios que se repitieron al mesclar el suelo con cal fueron: límites de Atterberg, compactación (Proctor Estándar), C.B.R. y expansión o hinchamiento.

5.3.4.1. Límites de Atterberg

Como anteriormente se describió, las proporciones de cal se determinaron a fin de obtener índices de plasticidad moderados. Los porcentajes de cal variaron entre el 1, 3, 5, 8, 10 y 15 porciento.

Límite líquido

Se realizó un procedimiento similar al utilizado con anterioridad para determinar estos límites; sin embargo solo se tomó un dato entre el rango de los 20-30 golpes con aparato de Casa Grande, la diferencia es que con el anterior se tomaron datos por encima y por debajo de los 25 golpes y se construyó la curva de humedades. Este dato se utilizó para determinar el límite líquido mediante la ecuación:

$$LI = \left(\frac{W_w}{W_s} * 100 \right) * k \quad \text{Ec. 4.3}$$



Tabla 4.5 Factores de corrección para el límite líquido.

Número de Golpes N	Factor de Corrección K
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.99
24	0.995
25	1
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Límite Plástico

Se utilizó el mismo procedimiento aplicado anteriormente, con el fin de obtener un aumento en el límite plástico.

Índice de Plasticidad.

Este se determinó de la misma forma, mediante la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

A continuación se presenta de forma gráfica el procedimiento desarrollado en la determinación de los límites de Atterberg.



Figura 4.12 Fotografías “Descripción del procedimiento límites de Atterberg”,
fuente propia



5.3.4.2. Ensayo de Compactación (Proctor Estándar) y C.B.R.

Este ensayo se realizó en paralelo con la prueba de C.B.R., dado que se utilizó el mismo procedimiento. Para dicho cometido se procedió a realizar mezclas de suelo con diferentes proporciones de cal, las cuales variaron. Estas proporciones fueron de 3, 6, 9 y 12 por ciento.

Se utilizó otro molde para su compactación, el cual facilitó el acceso del Geogauge para tomar los datos de Rigidez y módulo de elasticidad.



Figura 4.13 Fotografías “Preparación de muestras para ensayo Proctor y C.B.R.”, fuente propia



6. ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS.

En este capítulo se enfoca al análisis de los datos obtenidos durante la recolección de muestras y pruebas de laboratorio realizadas, del mismo modo se describen criterios aplicados y la interpretación de los métodos utilizados al igual que los resultados obtenidos mediante procesamiento de datos. Para dicho planteamiento retomaremos como etapas del proceso nuestros objetivos específicos; esto genera cuatro etapas fundamentales.

Todos los datos obtenidos fueron analizados de forma tabular haciendo uso del software “Microsoft Excel 2013”, en el cual se insertaron las ecuaciones propuestas por las distintas normas sobre las cuales se fundamenta nuestro estudio. Así mismo los datos también fueron procesados de forma manual para constatar la ausencia o reducción de posibles errores.

En base a esto procedemos a retomar las etapas mencionadas anteriormente de manera más profunda y concisa.

6.1. La Recolección y Caracterización de los Suelos de la Comunidad San Isidro del Pegón.

Se realizaron 10 calicatas de forma manual, 6 de estas a 1 metro de profundidad y 4 ubicado en zonas con edificaciones de relevancia y puntos críticos en la comunidad con profundidades de 2 metros. Anteriormente se describió que las 6 calicatas solo se realizaron para constatar las predominancias de los suelos y que presentarían las mismas características que las calicatas de mayor profundidad.

Es muy importante dejar en claro que aunque un proceso de estabilización no requiere profundidades mayores a 40 cm en el terreno natural, se realizaron calicatas con estas dimensiones, para verificar hasta que profundidades se presentaban suelos cohesivos. Esto supone la necesidad de utilizar métodos y equipos aún más especializados; sin embargo nos limitamos a la disponibilidad de los mismos.



6.1.1. Trabajo de Campo.

A continuación procedemos a describir datos relevantes obtenidos durante la extracción de muestras y los resultados del análisis (ver anexos figura 9.1).

6.1.1.1. Realización de Calicatas, Obtención de Muestras, Determinación de Humedades y Correlación de Muestras.

- Calicata #1.

Los datos aquí presentados corresponden a las características del suelo encontrado en la calicata número 1, durante la realización se dividió el suelo en 3 diferentes estrato (debido al cambio en la tonalidad del color); los datos de profundidad y humedad se muestran en la figura 6.1.

Luego de secar en el horno, estas muestras cambiaron de color, dicho cambio se presenta en la figura 6.2 y evidencia la presencia de un único estrato. A este estrato se le denomino Correlación 1.

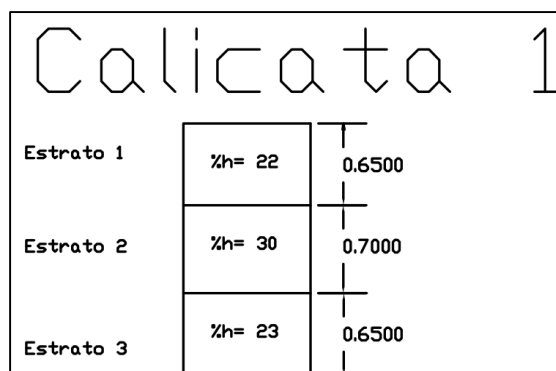


Gráfico 6.1 Distribución de humedades por estrato

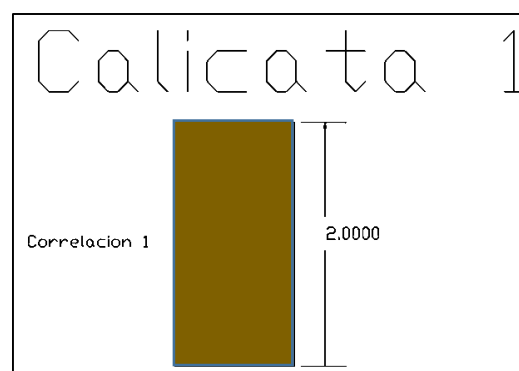


Gráfico 6.2 Correlación de los Estratos

- Calicata #2.

Al igual que en la calicata anterior se presentaron cambios en la tonalidad de los colores, por ende se dividieron la muestras en tres. En el caso de esta calicata tanto los colores como el resto de propiedades cambiaron luego de secarlos en el horno.



La figura 6.3 muestra la distribución de humedades en base a la profundidad y en la figura 6.4 se presentan las características del material secado y su identificación para la realización de los demás ensayos de laboratorio. Una vez identificado los suelos se notó que uno de los estratos poseía las mismas características que el estrato de la calicata 1.

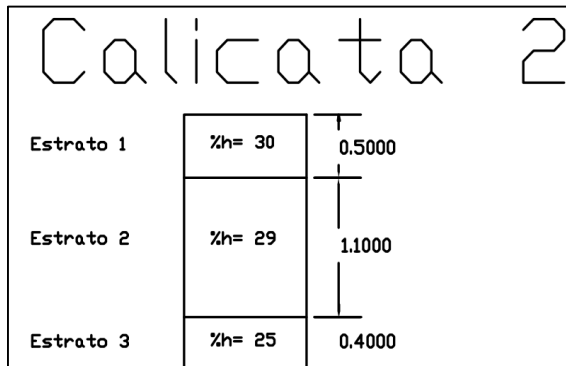


Grafico 6.3 Distribución de humedades por estrato

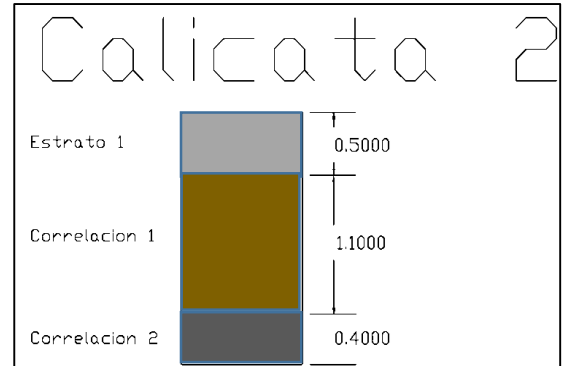


Grafico 6.4 Correlaciones de los Estratos

- Calicata #3

Los datos de humedad correspondientes a cada una de las muestras encontradas en esta calicata se presentan en la figura 6.5, de la misma forma que en las calicatas anteriores son tres diferentes datos. No obstante las características físicas indicaron la presencia de dos tipos de suelos.

Estos estratos se muestran en la figura 6.6 con la respectiva profundidad para cada uno de ellos.

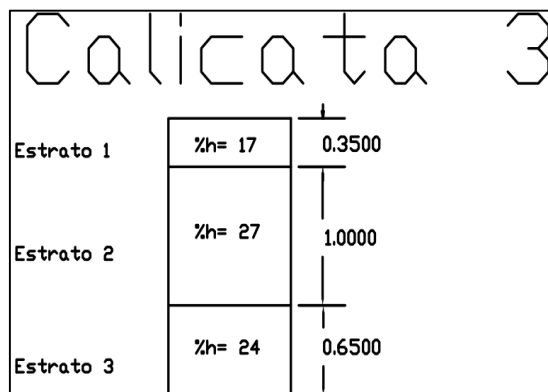


Grafico 6.5 Distribución de humedades por estrato

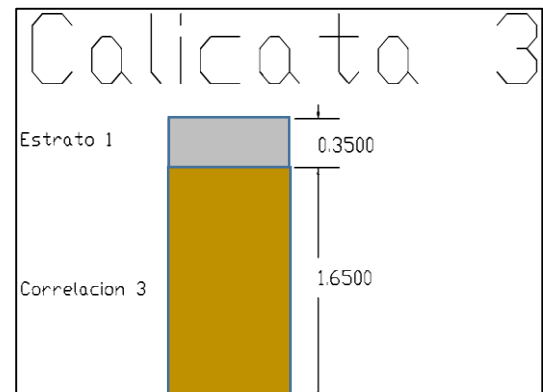


Grafico 6.6 Correlaciones de los Estratos



- **Calicata #4.**

Esta calicata presenta tres diferentes estratos tanto en la determinación de su humedad como en la correlación de sus muestras, dos de estratos muestras corresponden a la correlación 3 encontrada en la calicata número 3 y a la correlación 2 de la calicata número 2, (ver figuras 6.7 humedades y 6.8 correlaciones).

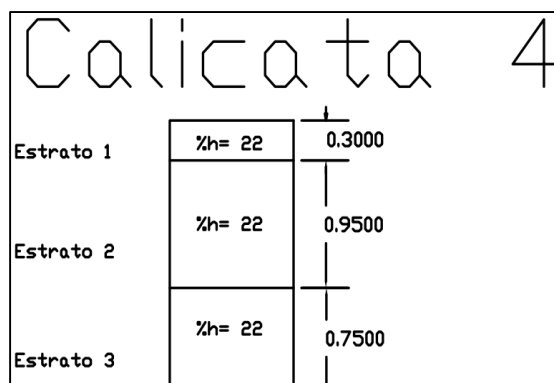


Gráfico 6.7 Distribución de humedades por estrato

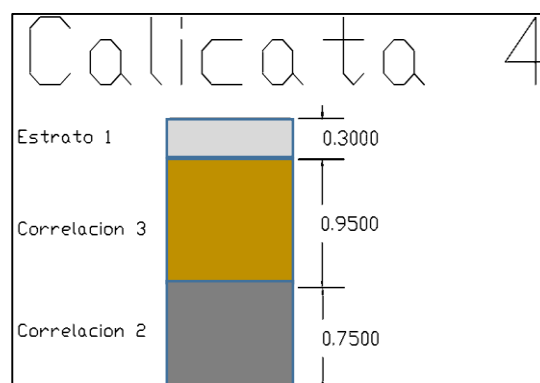


Gráfico 6.8 Correlaciones de los Estratos

La correlación de las muestras se realizó con el material seco, los criterios en los cuales nos centramos fueron el color y la textura de cada suelo. Estos dieron como resultado tres correlaciones nombradas anteriormente en los gráficos; para un total de 6 muestras.

Estas se sometieron a los análisis mencionados en el capítulo anterior y el cual se describió el proceso de ejecución.

6.1.2. Propiedades Físicas.

En un proyecto vial las propiedades de enfoque son reducidas por ende en este proyecto las características de suelo que determinamos fueron las siguientes:

- *Humedad*

Los datos de humedad de los suelos se presentaron anteriormente en los gráficos 6.1, 6.3, 6.5 y 6.7. Esto se debe a que la humedad de un suelo para



finés viales se debe determinar en campo y así obtener datos precisos en el caso de realizar un proceso de compactación en el mismo.

Para mantener las condiciones lo más parecido a las encontradas en las calicatas, se procedió a colocar porciones de muestra y sellarla inmediatamente manteniendo dicha humedad.

- *Gravedad Específica.*

La gravedad específica es una propiedad adimensional, esta es esencial para el cálculo del diámetro de partículas que pasan el tamiz # 200. Los datos obtenidos de la gravedad específica mediante el ensayo se muestran a continuación en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Gravedad específica de los suelos ensayados

GRAVEDAD ESPECIFICA						
ID- suelos	Correlación 1	Correlación 2	Correlación 3	Est 1-Cal 2	Est 1-Cal3	Est 1-Cal 4
Gravedad Especifica	2.51	2.29	2.48	2.74	2.71	2.51

- *Granulometría.*

Este ensayo se realizó en dos fases, en la primera se determinó la granulometría gruesa de las muestras mediante el método mecánico o granulometría por tamizado. Mediante el lavado del material y a través del tamiz # 200; se determinó la fracción de suelos que se retuvo en este, para luego secarlo y posteriormente tamizarlo.

La segunda fase corresponde a la granulometría fina, haciendo uso del hidrómetro, cuyo proceso fue descrito en el capítulo anterior. En este ensayo se determinaron las fracciones de limos y arcillas presentes en cada muestra.

Los resultados obtenidos mediante ambos análisis se presentan en la tabla 6.2, los datos muestran de forma concisa la predominancia de las partículas finas de suelo en todas las muestras; aunque el método HRB no hace referencia a lo que son porcentajes de arena en todas sus denominaciones (gruesa, media y



fina), ya que esta subclasificación de arenas es propia del método SUCS; se presentan para una mejor comprensión del comportamiento de estos suelos.

Tabla 6.2: Datos Granulométricos de los suelos ensayados.

Calicata	ID	Muestra	% grava	% arena gruesa	% arena media	% arena fina	% limo	% arcilla
Calicata 1	Correlación 1	M1	0	0	1	4	49	46
Calicata 2	Est1-Cal2	M1	0	0	3	14	11	72
Calicata 2	Correlación 1	M2	0	0	1	4	49	46
Calicata 2	Correlación 2	M3	0	0	1	7	25	67
Calicata 3	Est1-Cal3	M1	0	1	5	15	38	41
Calicata 3	Correlación 3	M2	0	0	0	5	64	31
Calicata 4	Est1-Cal4	M1	0	0	2	17	63	18
Calicata 4	Correlación 3	M2	0	0	0	5	64	31
Calicata 4	Correlación 2	M3	0	0	1	7	25	67

- *Límites de Atterberg.*

Los límites de Atterberg son parámetros que indican el comportamiento de un suelo en contacto con un líquido, en este ensayo se determinaron dichos límites: el Limite líquido (LL), Limite plástico (LP) y su respectivo Índice de Plasticidad (IP). A continuación se presentan en la tabla 6.3, ver anexos (para los gráficos anexos apéndice C).

Tabla 6.3: Limites de Atterberg para cada muestra.

Calicata	ID	Muestra	LL	LP	IP
Calicata 1	Correlación 1	M1	54	25	29
Calicata 2	Est1-Cal2	M1	59	30	29
Calicata 2	Correlación 1	M2	54	25	29
Calicata 2	Correlación 2	M3	51	28	23
Calicata 3	Est1-Cal3	M1	50	29	21
Calicata 3	Correlación 3	M2	54	27	27
Calicata 4	Est1-Cal4	M1	40	22	18
Calicata 4	Correlación 3	M2	54	27	27
Calicata 4	Correlación 2	M3	51	28	23



6.1.3. Clasificación de Los Suelos de la Comunidad San Isidro.

Con las propiedades que se han presentado en los acápite anteriores se procedió a clasificar los suelos de la comunidad, esta se presenta en la tabla 6.4.

Tabla 6.4: Clasificación de las Muestras de Suelos según el Método HRB.

Calicata	ID	muestra	HRB	Descripción
Calicata 1	Correlación 1	M1	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como subrasante de Regular a Pobre, Color marrón Oscuro
Calicata 2	Est1-Cal2	M1	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como subrasante de Regular a Pobre, Color Gris Claro
Calicata 2	Correlación 1	M2	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como subrasante de Regular a Pobre, Color marrón Oscuro
Calicata 2	Correlación 2	M3	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como subrasante de Regular a Pobre, Color Gris Oscuro
Calicata 3	Est1-Cal3	M1	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como Subrasante de Regular a Pobre, Color Gris Claro
Calicata 3	Correlación 3	M2	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como Subrasante de Regular a Pobre, Color Marrón Claro
Calicata 4	Est1-Cal4	M1	A-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como subrasante de Regular a Pobre, Color Gris Claro
Calicata 4	Correlación 3	M2	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como Subrasante de Regular a Pobre, Color Marrón Claro
Calicata 4	Correlación 2	M3	A-7-6	Suelos Arcillosos, Comportamiento como subrasante de Regular a Pobre, Color Gris Oscuro

6.1.4. Propiedades Mecánicas.

Se realizaron los diferentes ensayos a fin de determinar las propiedades de resistencia, estos comprendieron las siguientes pruebas: Ensayo Proctor Estándar, determinación de C.B.R. por métodos indirectos y ensayo de expansión unidimensional.

- Ensayo Proctor.

Este ensayo se realizó para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima, del ensayo Proctor Estándar se tomaron 3 datos por debajo de la humedad óptima y 3 datos por encima de esta. Los datos mostrados corresponden al suelo en sus mejores condiciones una vez compactado, de la misma forma como se ha descrito, este ensayo se realizó a una única muestra producto de la mezcla de 5 de los suelos anteriormente ensayados.



Esta mezcla se realizó con las 5 muestras que poseían la misma clasificación según el método HRB; para ello se tomaron porciones de suelo iguales y se colocaron en la máquina de los ángeles para homogenizar. En la tabla 6.5 se muestran los datos obtenidos

Tabla 6.5: Datos del ensayo de Compactación.

Ensayo Proctor Estándar		
Parámetro	Densidad Seca Máxima	Humedad Óptima
Datos	1.512	21

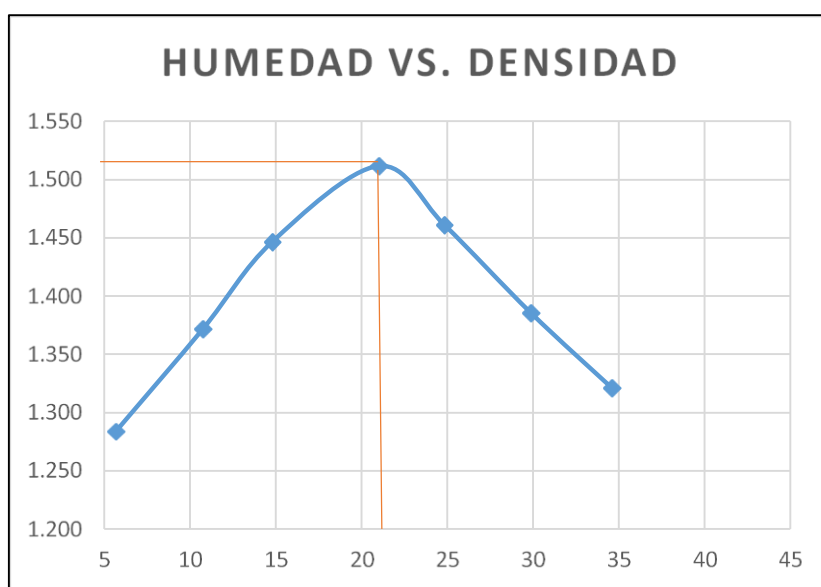


Grafico 6.9 Curva de Compactación

- Capacidad de Carga (C.B.R.).

Este ensayo se realizó con métodos indirectos con ayuda de los equipos martillo de Clegg y Geogauge, en ambos casos se tomaron 5 lecturas. En el ensayo con el geogauge se tomó el promedio de las 5 lecturas, ya que tendía a oscilar.

Con el martillo de clegg se tomó la lectura que se repetía, este dato se conoce comúnmente como moda, al ser métodos para determinar capacidad de carga en campo, se trató de simular las condiciones del suelo natural; por ende la presencia del molde de madera que se utilizó en este ensayo ver tabla 6.6.



Tabla 6.6: C.B.R. de los suelos Con martillo de Clegg y Geogauge.

Ensayo indirecto de C.B.R.	
Equipo	C.B.R.
Geogauge	15.70
Martillo de Clegg	16.28

- *Expansión o Hinchamiento.*

Se realizaron dos ensayos de expansión unidimensional en el cual se sometió al suelo producto de la mezcla a una sobrecarga y a la saturación con agua por un periodo de 72 horas, de los datos obtenidos se tomó la media entre las dos lecturas; los resultados se muestran a continuación.

Tabla 6.7: Promedio de la Prueba de hinchamiento.

ENSAYO DE EXPANSIÓN	
Porcentaje de Cal	0%
Lectura Inicial	0
Lectura Final	10
% Expansión	7.9

6.2. Determinación de Porcentajes y Obtención del Porcentaje Optimo para la Estabilización.

Luego de la obtención de cada una de las características, se dosificaron mezclas de suelo con cal hidratada; las propiedades en las cuales se enfocó la estabilización fueron: límites de Atterberg, densidad de compactación y humedad, C.B.R. y expansión. En si se trató de reducir el límite líquido y aumentar el límite plástico, de igual manera aumentar las densidades de compactación junto con la humedad optima, obtener un aumento en la capacidad de soporte del suelo y disminuir la expansión del mismo; todo esto de forma que al aumentar el porcentaje de cal se obtuvieran mejoras en las propiedades que se mencionaron anteriormente.



Del mismo modo se obtuvo un porcentaje óptimo de cal, para el cual las propiedades cumplían algunos de los requisitos planteados en la tabla 2.2., a continuación se presentan los datos y resultados obtenidos.

6.2.1. Límites de Atterberg.

Antes de comenzar a realizar esta prueba se determinaron los límites de Atterberg para la mezcla, producida por muestras a las que se le determinaron con anterioridad estas propiedades. Luego se propusieron diferentes dosificaciones de cal y posteriormente se determinaron tanto el límite líquido, como el límite plástico.

Los límites se determinaron por medio de la toma de una lectura en la copa de Casagrande, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.8

Tabla 6.8: Límites del suelos estabilizado.

LÍMITES DE ATTERBERG							
Porcentaje de Cal	1	3	6	8	9	10	12
Límite Líquido	53	47	46	45.5	44	44.2	45
Límite Plástico	32	33	34	35	35	36	32
Índice de Plasticidad	21	14	12	11	9	8	13

6.2.2. Ensayo de Compactación Proctor Estándar.

El ensayo Proctor se realizó en paralelo al de capacidad de carga, ya que se utilizó el mismo molde, para su ejecución se tomaron como referencia cuatro dosificaciones de cal; estas fueron: 3, 6, 9 y 12 por ciento. El criterio en el que se basó esta selección, fueron los intervalos conseguidos en el índice de plasticidad en el ensayo que lo precede.

Del mismo modo que en el caso anterior cuando se realizó el ensayo Proctor sin cal, los parámetros fueron los mismo, la única variante fue el molde de compactación. A continuación se muestran los datos de densidades secas máximas y humedades óptimas de compactación, los gráficos se presentan en el capítulo 9, apéndice C.



Tabla 6.9: Datos del Ensayo de Compactación en diferentes concentraciones de Cal deshidratada.

DATOS DEL SUELO ESTABILIZADO		
Porcentaje de Cal	Proctor	
	Densidad Seca Máxima	Humedad Optima
3	1.562	28
6	1.578	33
9	1.621	35
12	1.597	37

6.2.3. Capacidad de Carga.

En este ensayo no se utilizó la humedad óptima debido a que se realizó en paralelo con el ensayo Proctor estándar y el del martillo de Clegg; para ahorrar tiempo y minorar esfuerzos de trabajo. Los rangos de humedad entre cada porcentaje de cal difieren, debido a las humedades presentes en el suelo y que los porcentajes de la misma fueron acumulativos.

Se consiguió un aumento en las humedades óptimas de compactación a medida que se variaba el porcentaje de cal, los datos del ensayo se presentan en la tabla 6.10.

Tabla 6.10: Datos del ensayo de la Capacidad de Carga.

DATOS DEL SUELO ESTABILIZADO		
Porcentaje de Cal	C.B.R.	
	Geogauge	Martillo de Clegg
3	30.31	35.4
6	54.35	57.64
9	57.2	64.04
12	29.48	36.95

6.2.4. Expansión o Hinchamiento

A ser realizado en conjunto con el ensayo de expansión sin cal, se tomaron los mismos criterios de análisis, ejecutando dos ensayos para cada porcentaje de



cal utilizado. Para la presentación de los resultados se tomaron en cuenta ambos y se procedió a calcular la media de los mismos, ver tabla 6.11.

Tabla 6.11: Resultados del Ensayo de Expansión Unidimensional con Cal.

ENSAYO DE EXPANSIÓN				
Porcentaje de Cal	3%	6%	9%	12%
Lectura Inicial	0	0	0	0
Lectura Final	8	6	4	7
Expansión	6.3	4.7	3.1	5.5

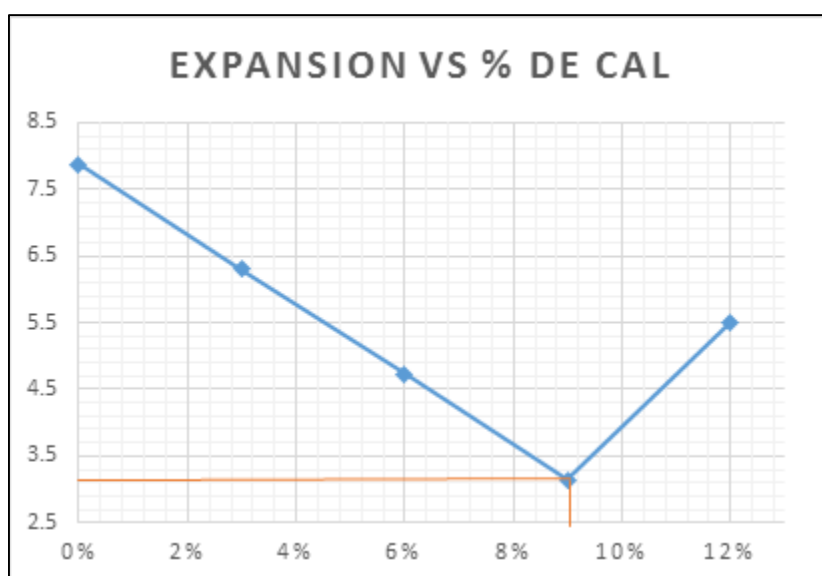


Gráfico 5.20 Variación de la Expansión en Base al % de Cal

6.3. Reducir la Susceptibilidad de los Suelos al Hinchamiento.

El análisis de los datos obtenidos en el ensayo, muestra la vulnerabilidad de los suelos de esta comunidad hacia esta propiedad tan problemática, esto en el ámbito de la ingeniería de caminos; los resultados muestran una reducción significativa de la misma al introducir el porcentaje de cal propuestos y se logra apreciar el impacto de la cal como agente estabilizador.

Es evidente al observar la gráfica 6.10, que esta reduce de forma constante al adicionar la cal; sin embargo llega a un punto donde en vez de obtener mejoras



de la misma, la expansión del suelo se dispara nuevamente. Para una mejor comprensión de esto se presenta a continuación la tabla 6.12

Tabla 6.12: Reducción del Hinchamiento en relación al porcentaje de cal.

ENSAYO DE EXPANSIÓN					
Porcentaje de Cal	0%	3%	6%	9%	12%
Expansión	7.9	6.3	4.7	3.1	5.5
Reducción de Expansión %	0.0	20	41	61	30

6.4. Contribución Sistemática a Métodos de Estabilización con Cal.

En el campo de la ingeniería dependemos de distinta condiciones para saber si un método es aplicable o no, por lo que nos vemos forzados a investigar y llegar más a fondo aplicando lo investigado; no obstante pueden existir métodos que aunque sean más efectivos incurren en gastos mayores a los planeados. En base a esto, se planteó el desarrollo de este proyecto vial en la comunidad San Isidro, determinando las condiciones de sus vías y clasificando sus suelos, es evidente la necesidad de llevar a cabo un proceso de reacondicionamiento en las mismas.

La cal aunque no es un elemento usado comúnmente en el ámbito de la estabilización, dio resultados satisfactorios en la mayor parte de las propiedades que se tomaron como base para la realización de este proyecto, ver tabla 6.13.

Tabla 6.13: Propiedades del suelo antes y luego de ser estabilizado.

PROPIEDADES DEL SUELO ESTABILIZADO								
Porcentaje de Cal	Límites de Atterberg			Proctor		C.B.R.		Expansión
	LL	LP	IP	γ_d	HO	Geogauge	Martillo de Clegg	
0	54	28	26	1.512	21	15.70	16.28	7.9
3	47	33	14	1.548	28	30.31	35.4	6.3
6	46	34	12	1.578	33	54.35	57.64	4.7
9	44	35	9	1.603	35	57.2	64.04	3.1
12	45	32	13	1.597	37	29.48	36.95	5.5



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1. Conclusiones.

Las vías de la comunidad San Isidro, presenta múltiples puntos afectados producto de lluvias (ver anexos, apéndice a), mediante el reconocimiento a lo largo de estas, se ubicaron los puntos con mayores afectaciones y siendo estos en parte puntos obligados a lo largo de estas vías; aunque en esta comunidad no existen grandes edificaciones, posee un gran potencial económico. De 4 puntos específicos se extrajeron muestras de suelos, las cuales se catalogaron según su color y textura, sin embargo luego de secarlos en horno y determinar la humedad, se notó la predominancia de 6 muestras a las que se procedió analizar para determinar sus propiedades.

Al analizar estas muestras se obtuvo que el suelo que predomina es un A-7-6 que según la normativa AASHTO son suelos con baja capacidad de carga, un alto índice de plasticidad; además de un alto porcentaje de expansión debido al cambio de la humedad. Estos datos de laboratorio se muestran en la tabla 6.13; no obstante, el estrato número 1 de la calicata 4 es un suelo A-6, aunque no posee las mismas características que el suelo descrito anteriormente, no deja de ser un suelo con condiciones no deseables en un proyecto vial.

Luego de haber caracterizado y clasificado este suelo, se mezclaron las 5 muestras que correspondía a la clasificación A-7-6, y se determinó su índice de plasticidad; a partir de este punto se propusieron las dosificaciones mostradas en la tabla 6.8. Debido a que eran demasiados ensayos para realizar, se retomaron los porcentajes en los que hubiese mayor cambio siendo estos los de 3, 6, 9, y 12 por ciento.

Al determinar las propiedades con estos porcentajes se obtuvo una mejora significativa en cuanto a la plasticidad, densidad de compactación; se aumentó la humedad requerida en este proceso debido a la reacción exotérmica producida entre la cal y la arcilla, se aumentó significativamente la capacidad de soporte del suelo. Aunque no se cumplió con el parámetro de expansión propuesto en la tabla 2.2, se logró un resultado aceptable.



De los porcentajes anteriores se determinó que con 9 por ciento de cal se obtenían las mejores condiciones de suelo cumpliendo con la mayor parte de las propiedades propuestas en la tabla 2.2, (ver tabla 7.1). Ciertamente la expansión o hinchamiento es la propiedad con mayor incidencia en estos suelos, logrando una reducción del 61 por ciento con la adición óptima de cal.

Tabla 7.1: Comparación entre las características del suelo natural y estabilizado, con las estándares requeridos en una subrasante para proyectos viales.

Característica	Valor Requerido	Valor del Suelo Estabilizado	Valor de suelo Natural
Límite Líquido; % máximo	40	44	54
Índice Plástico; % máximo	12	9	26
(CBR) ; % mínimo	20	57.2	16.28
Expansión máxima; %	2	3.1	7.9
Grado de compactación; %	100±2	100	100

Es evidente que no cumplimos a cabalidad con los estándares requeridos, sin embargo se logra una mejora considerable en estas propiedades y tomando en cuenta que un proyecto vial de este tipo, no solo incluye la estabilización de una subrasante, puede ser aplicado siempre y cuando se tome en cuenta para diseñar el resto de la estructura del pavimento.



7.2. Recomendaciones

Como bien mencionamos en acápite anteriores este estudio pretende servir como un proyecto piloto, por consiguiente, acorde a esta metodología se pueden realizar:

- La estabilización de los suelos en estas vías con otro tipo de cal, para la cual las condiciones cumplan con los estándares requeridos.
- La estabilización de los suelos en esta comunidad con otro tipo de agregados.
- Formulación de proyectos en las vías de la comunidad San Isidro.
- Creación de guías para estabilizar suelos cohesivos en nuestro país.

Finalmente podemos recomendar la estabilización de estos suelos con otro tipo de Cal, esta pudiese ser Cal Viva; así determinar si se logran cumplir con los estándares requeridos.

De igual manera utilizar este trabajo como una guía básica, para estabilizar suelos cohesivos en diferentes puntos de nuestro país y fomentar a la creación de un manual, el cual aplique e instruya a la formulación de mezcla para estabilización.



8. REFERENCIAS

Alcaldía Municipal. (2010). *Ficha Municipal-Potosí*. Informativo, Rivas, Potosí.

Álvarez J, C., & Echeverri J, D. (1999). *Estabilización de arcillas expansivas con cal hidratada*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

ASTM International . (2007). ASTM Standard D 698. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2007). ASTM D 854. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2007). ASTM D4829 - 11 . *Standard Test Method for Expansion Index of Soils*. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2007). ASTM Standard D 1883. *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils , Bearing ratio*. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2007). ASTM Standard D 2216. *"Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass"*. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2007). ASTM Standard D 422. *"Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils"*. Pensilvania, Estados Unidos.

ASTM International. (2007). ASTM Standard D 4318. *"Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils"*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos.



Bernal C, A. (2006). *Metodología de la investigación* (2da ed.). Mexico: Pearson Educación de México, S.A de C. V.

Berrios V, F., & Chavarría P, D. (2011). *Análisis y Evaluación del Proceso de compactación de los suelos en obras horizontales*. Managua, Nicaragua: Jornada Universitaria De Desarrollo Científico (JUDC).

Berry, P., & Reid, D. (1993). *Mecánica de Suelos*. (B. Caicedo, Trad.) Bogota, Colombia: McGraw-Hill Latinoamérica, S.A.

Blanco Rodriguez, M., & Matuz Lazo, I. (2006). *Guías de laboratorio de materiales de construcción*. Managua, Nicaragua.

Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (4ta ed.). Mexico: Limusa, S.A. de C.V.

Das, B. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (I. Bernal Carreño, Trad.) D.F., Mexico: Thomson Learning.

Fletes R, T. (2004). *Materiales de construcción nicaragüense*. Managua.

Gamica, P., Pérez, A., & Obil, E. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en vías terrestres*. Publicación Técnica No. 201.

Herrera, C., & Ortiz, S. (2013). Comportamiento de los Suelos, Municipio Potosí. *La Calera*, 13(21).

INETER. (2005). *Informe del estado ambiental en Nicaragua*. Hidrografía, Managua.

INIFOM. (1997). *Caracterizaciones Municipio, Potosí*. Informativo, Rivas.

INITER. (1999). *Política Nacional de Ordenamiento Territorial*. Propuesta, Managua.



Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2007). *Mecánica de suelos I, II Fundamentos de la mecánica de suelos* (2da ed.). Mexico: Limusa, S.A. de C.V.

MALDONADO HUEZO, H. M., & ORELLANA MARTINEZ, A. C. (2009). *GUIA BASICA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS*. SALVADOR.

MAS & MAGFOR. (2008). *Caracterización, Diagnóstico, y Recomendaciones Políticas para el Desarrollo del Platano*. Rivas.

Metodos de Estabilizacion de Suelos. (15 de 2 de 2010). Obtenido de Apuntes Ingenieria Civil: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2011/03/metodos-estabilizacion-de-suelos.html>

MIFIC. (2007). *Norma Técnica Nicaragüense para el Uso y Manejo del Suelo*. Rivas.

Ruiz Torrez, I. (22 de 9 de 2013). *Historia de la cal*. Obtenido de Sobre la Cal: <http://sobrelacal.wordpress.com/about/>

UNAN. (2011). *Guías de Laboratorio de Suelos*. Managua.



9. ANEXOS

9.1. Apéndice A: Localización y descripción de los Sondeos Principales



Figura 9.1: Fotografías de la localización de los sondeos, fuente propia



Figura 9.2: Fotografías de los Sondeos, fuente propia



9.2. Apéndice B: Ensayos de Laboratorio.



Figura 9.3: Fotografías Prueba de granulometría, fuente propia



Figura 9.4: Fotografías preparación de muestras para prueba de Hidrometría, fuente propia



Figura 9.5: Fotografías Destilación de Agua, fuente propia

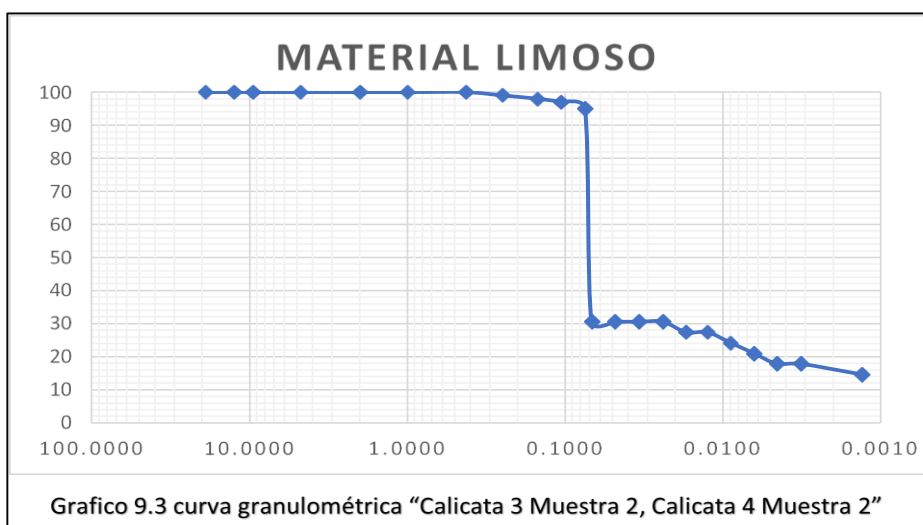
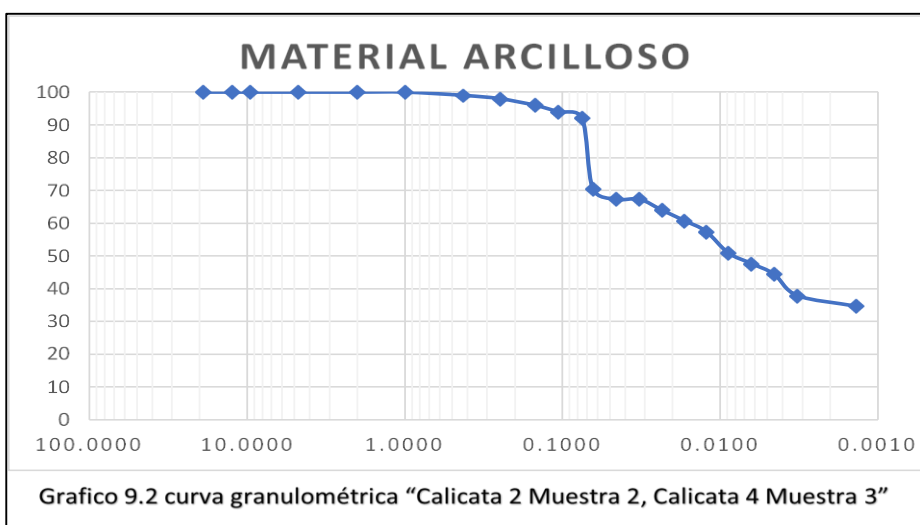
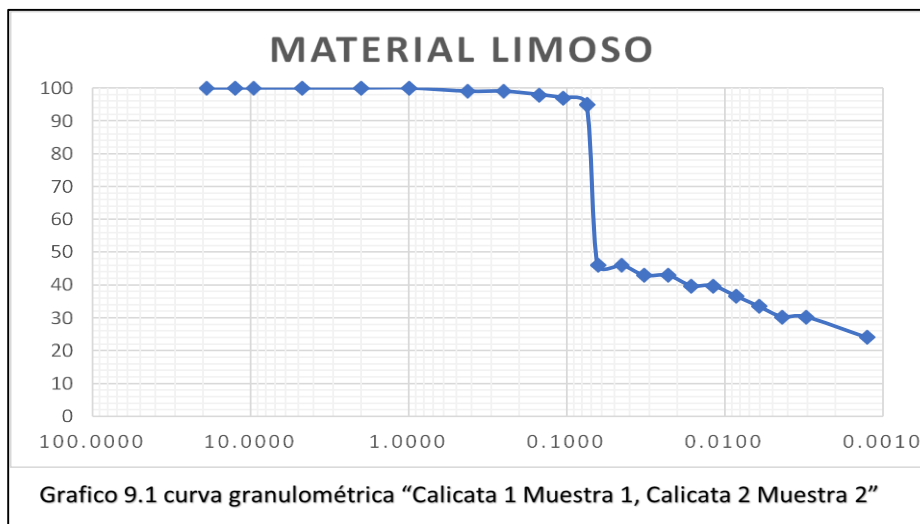


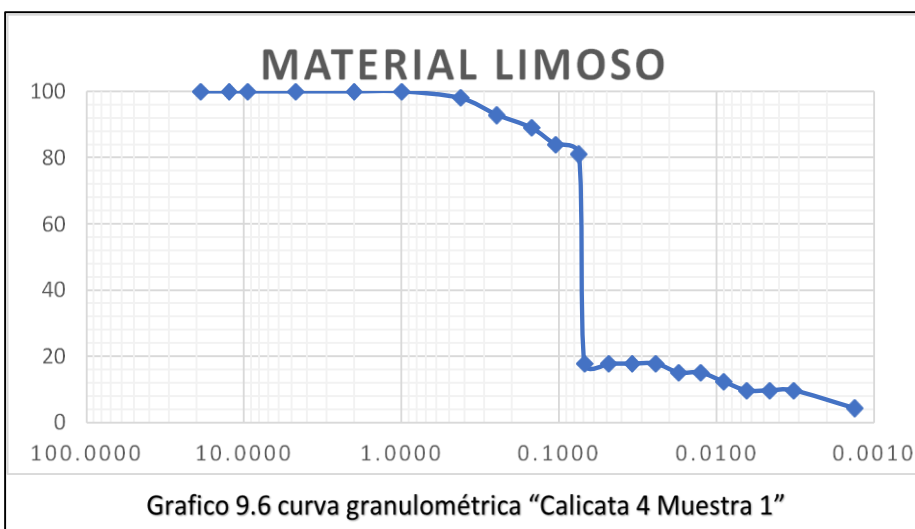
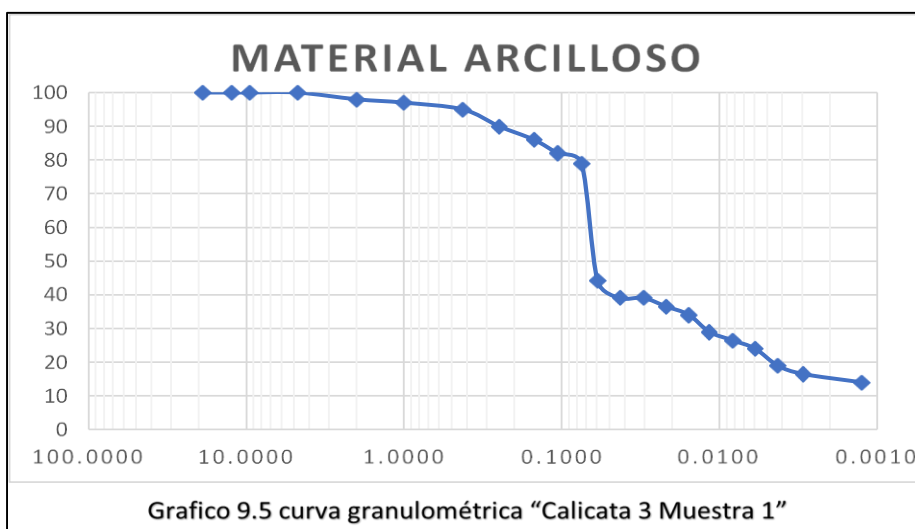
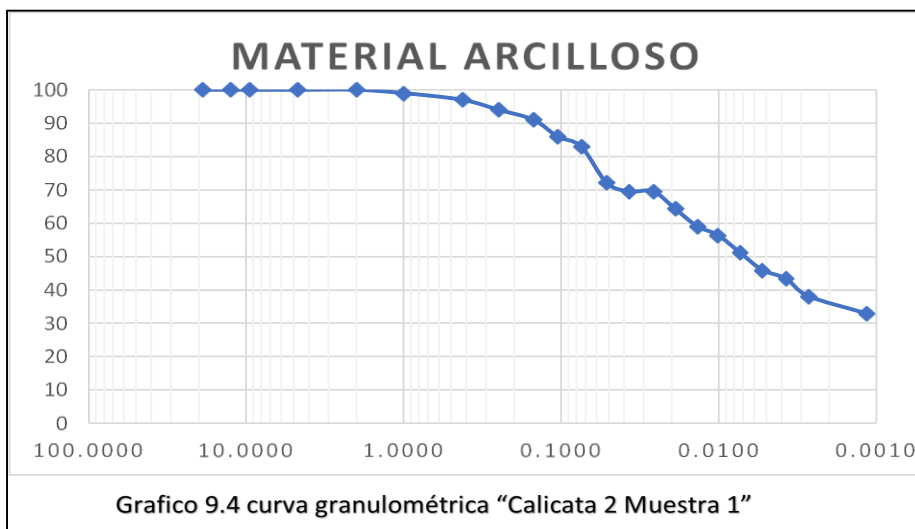
Figura 9.6: Fotografías Disgregador de suelos, fuente propia.



9.3. Apéndice C: Graficas de las diferentes pruebas realizadas.

9.3.1. Curvas Granulométricas







9.3.2. Límites de Atterberg

A continuación se muestran los Curvas para la determinación del límite líquido.

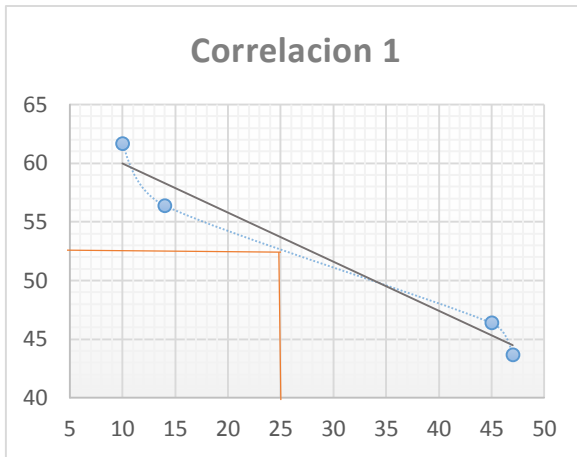


Gráfico 9.7 curva humedades “Correlación 1”

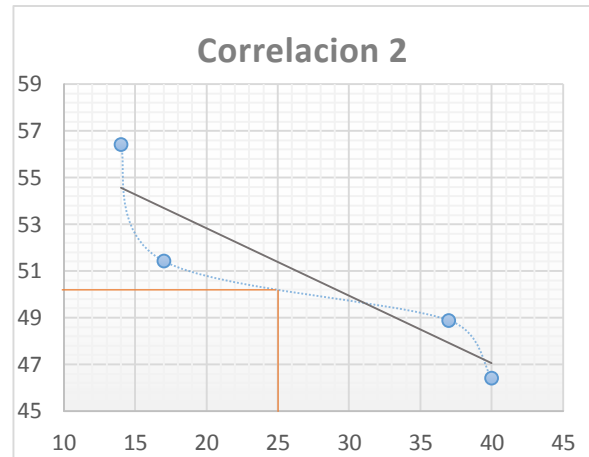


Gráfico 9.8 curva humedades “Correlación 2”

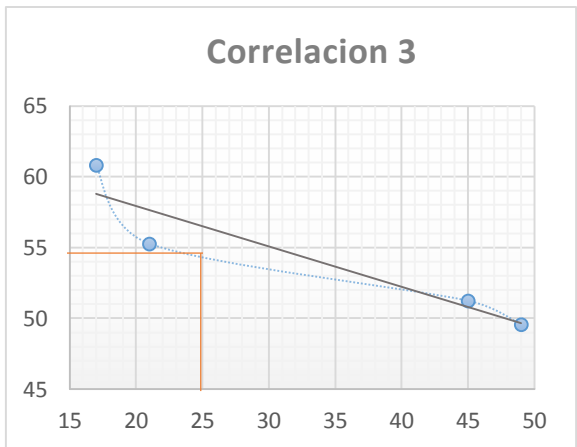


Gráfico 9.9 curva humedades “Correlación 3”

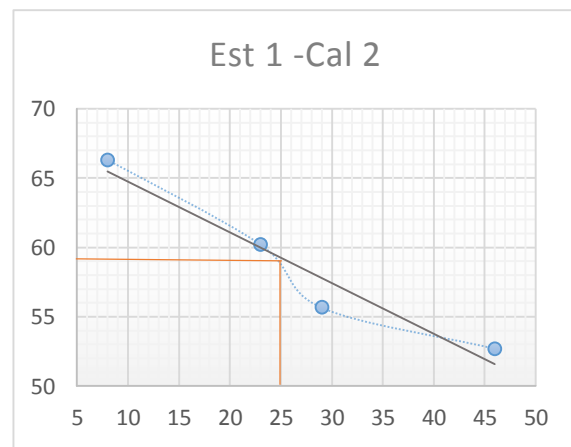


Gráfico 9.10 curva humedades “Est. 1-Cal 2”

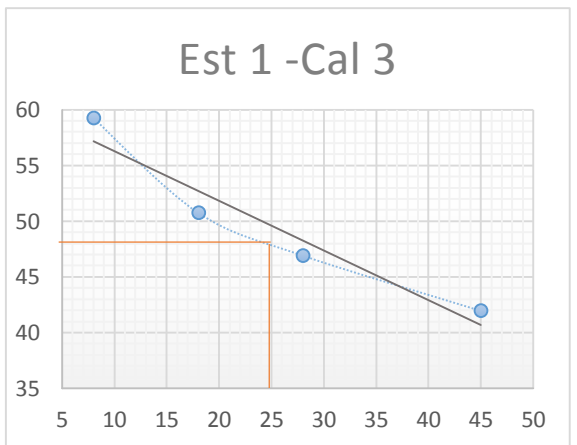


Gráfico 9.11 curva humedades “Est. 1-Cal 3”

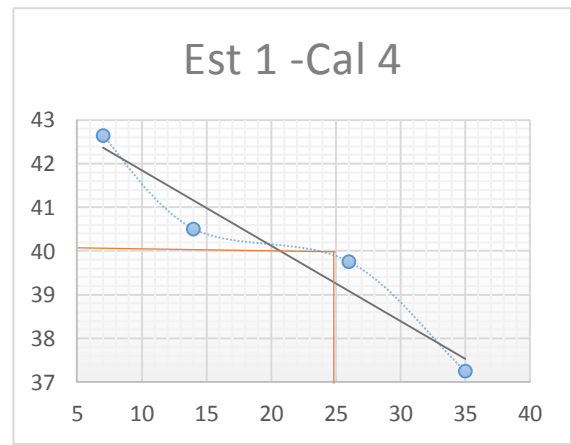


Gráfico 9.12 curva humedades “Est. 1-Cal 4”



9.3.3. Curvas de Compactación del Suelo Estabilizado.

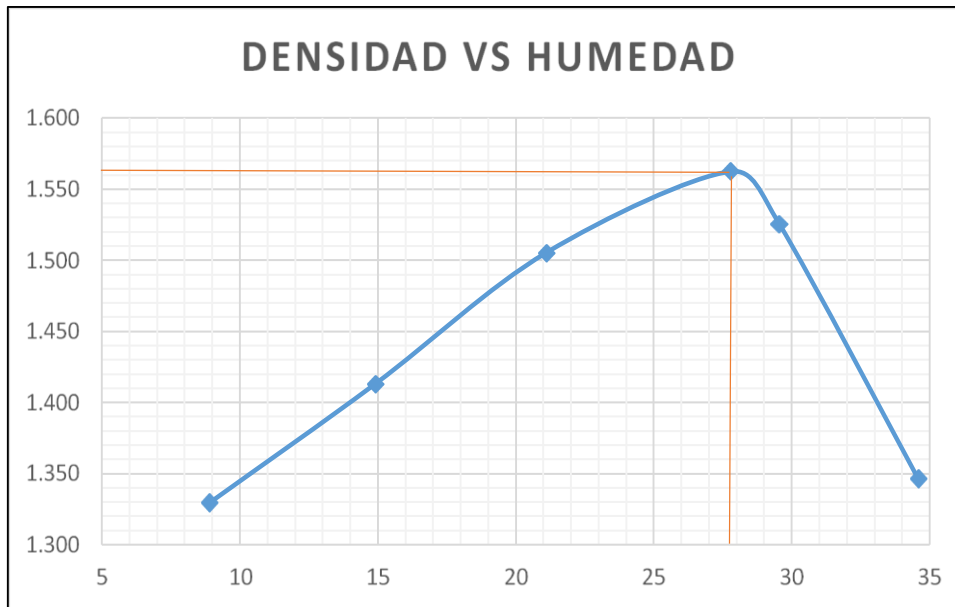


Grafico 9.13 Curva de compactación 3% de Cal

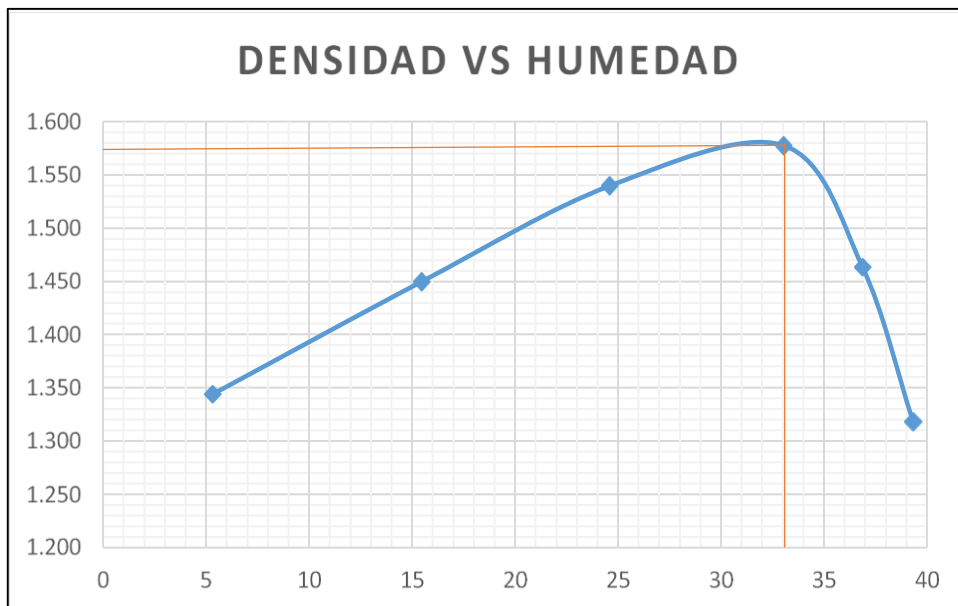


Grafico 9.14 Curva de compactación 6% de Cal

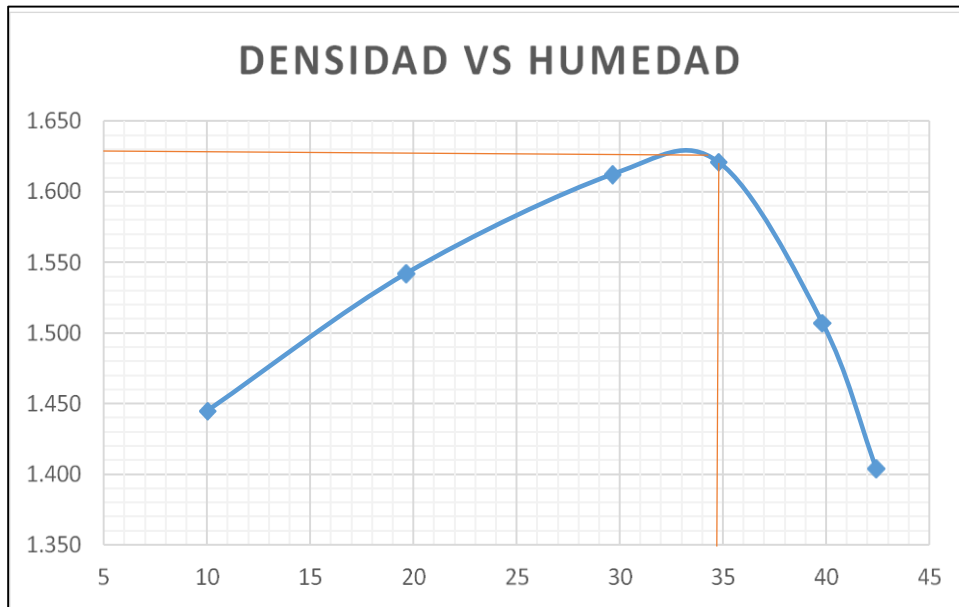


Grafico 9.15 Curva de compactación 9% de Cal

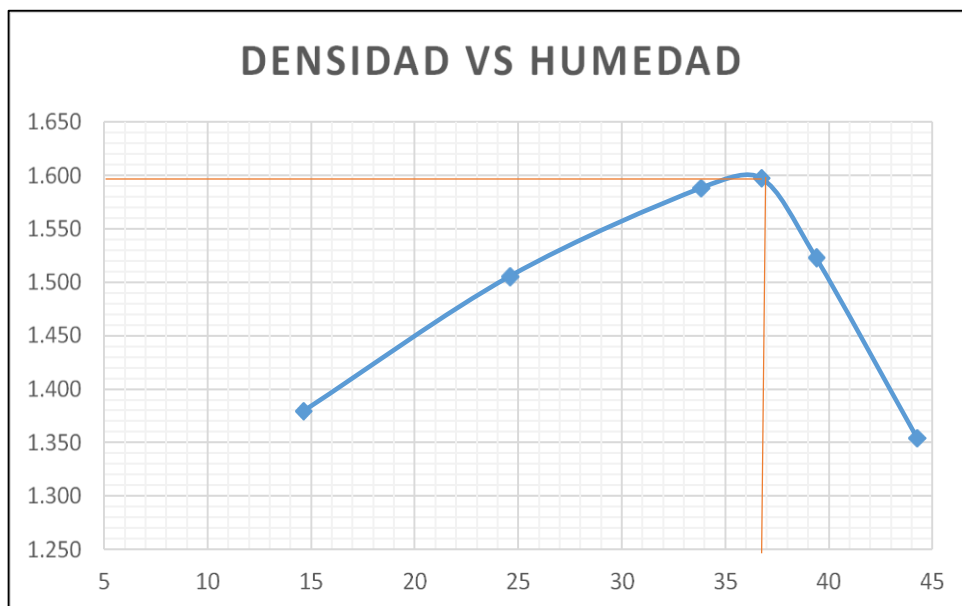


Grafico 9.16 Curva de compactación 12% de Cal



9.4. Apéndice D: STRATER.

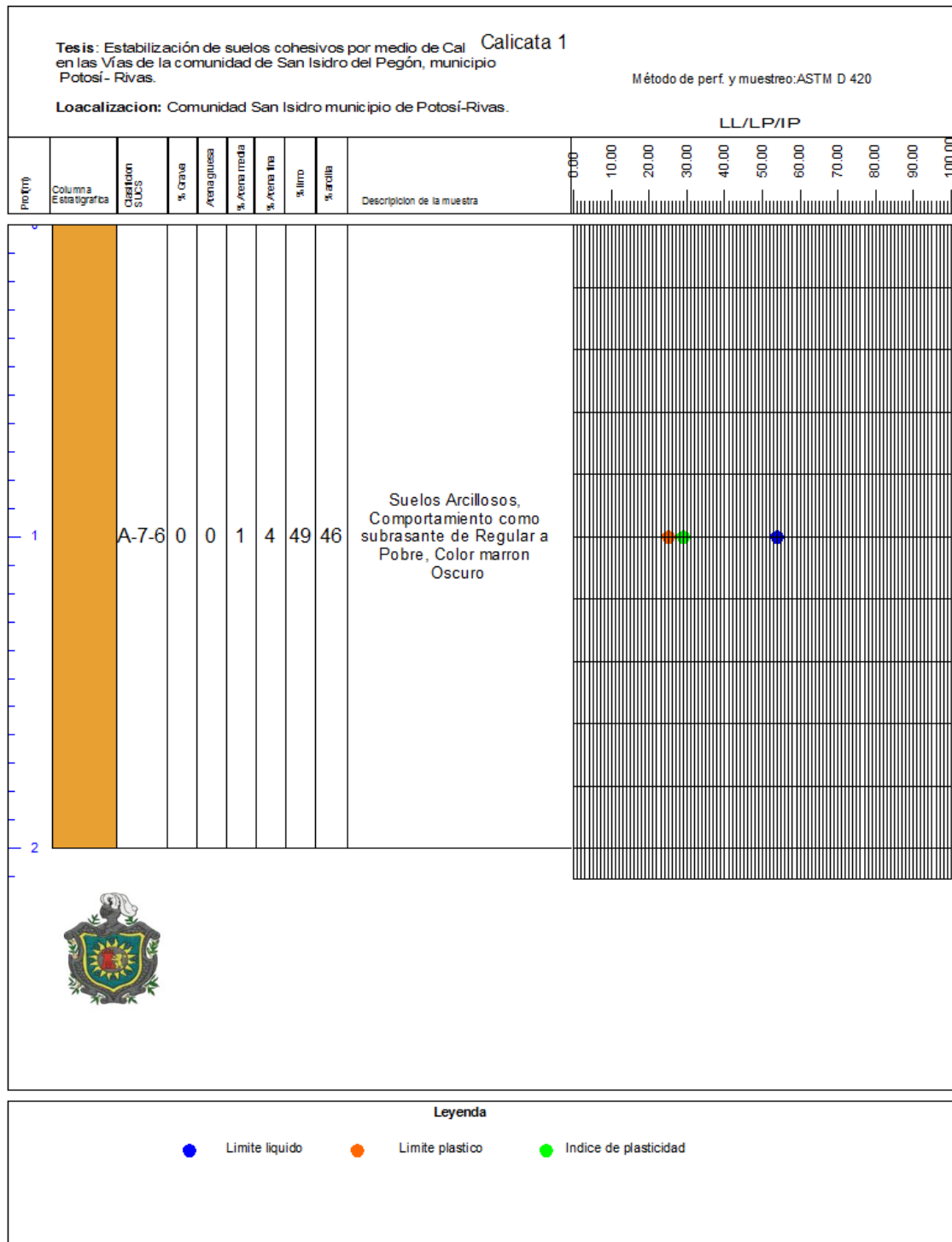


Figura 9.7: Columna Estratigráfica Calicata 1, fuente propia

Capítulo 9: Anexos

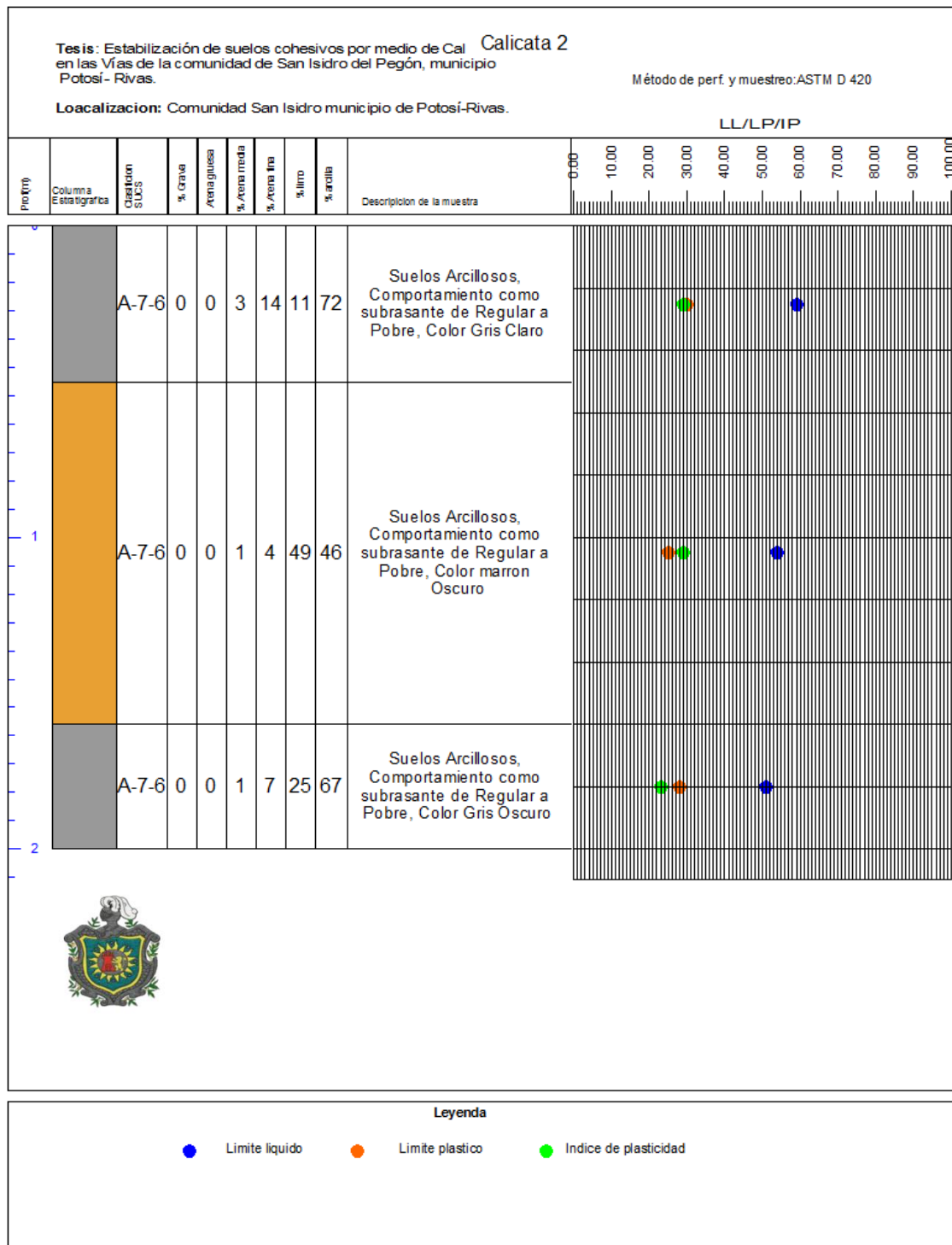


Figura 9.8: Columna Estratigráfica Calicata 2, fuente propia

Capítulo 9: Anexos

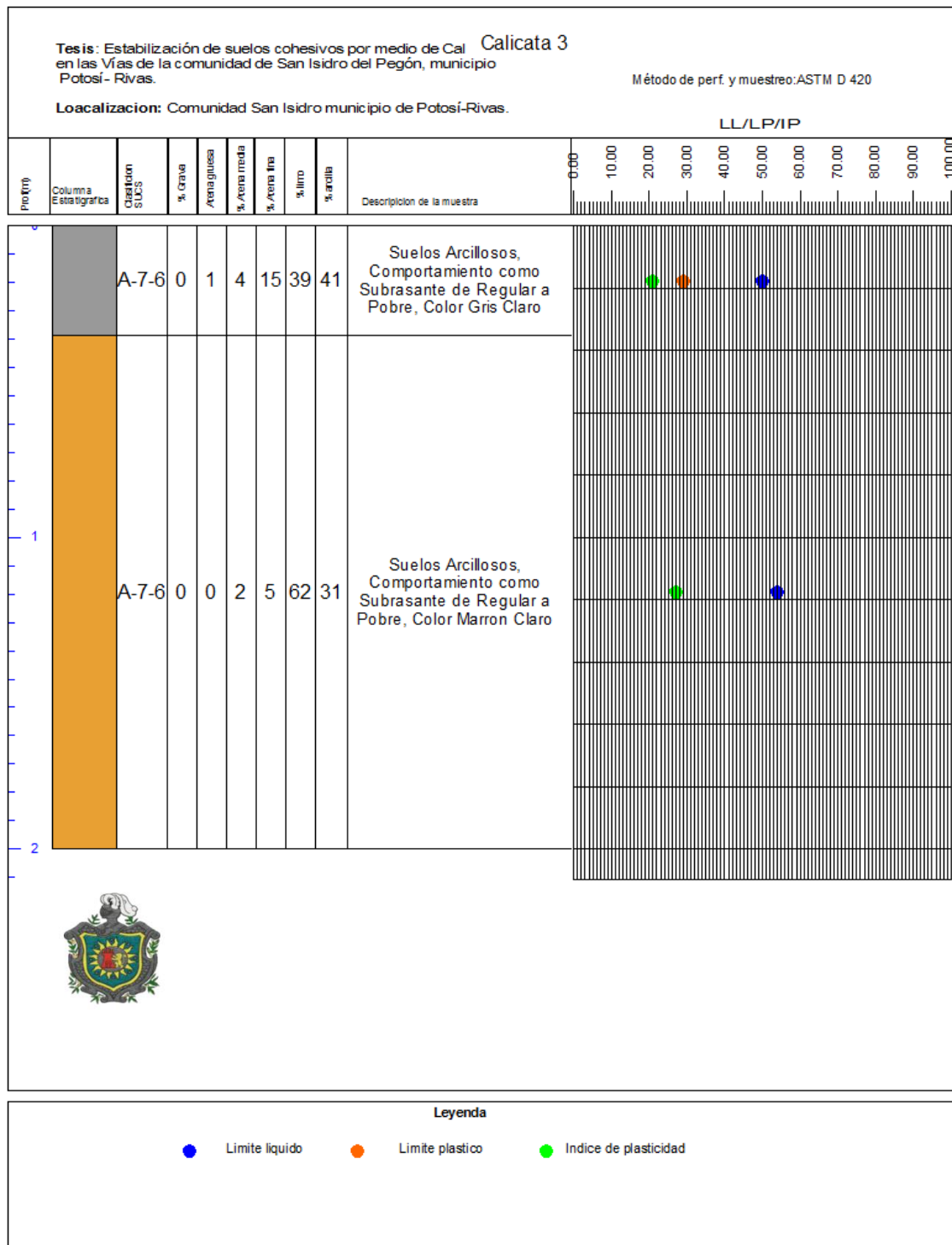


Figura 9.9: Columna Estratigráfica Calicata 3, fuente propia

Capítulo 9: Anexos

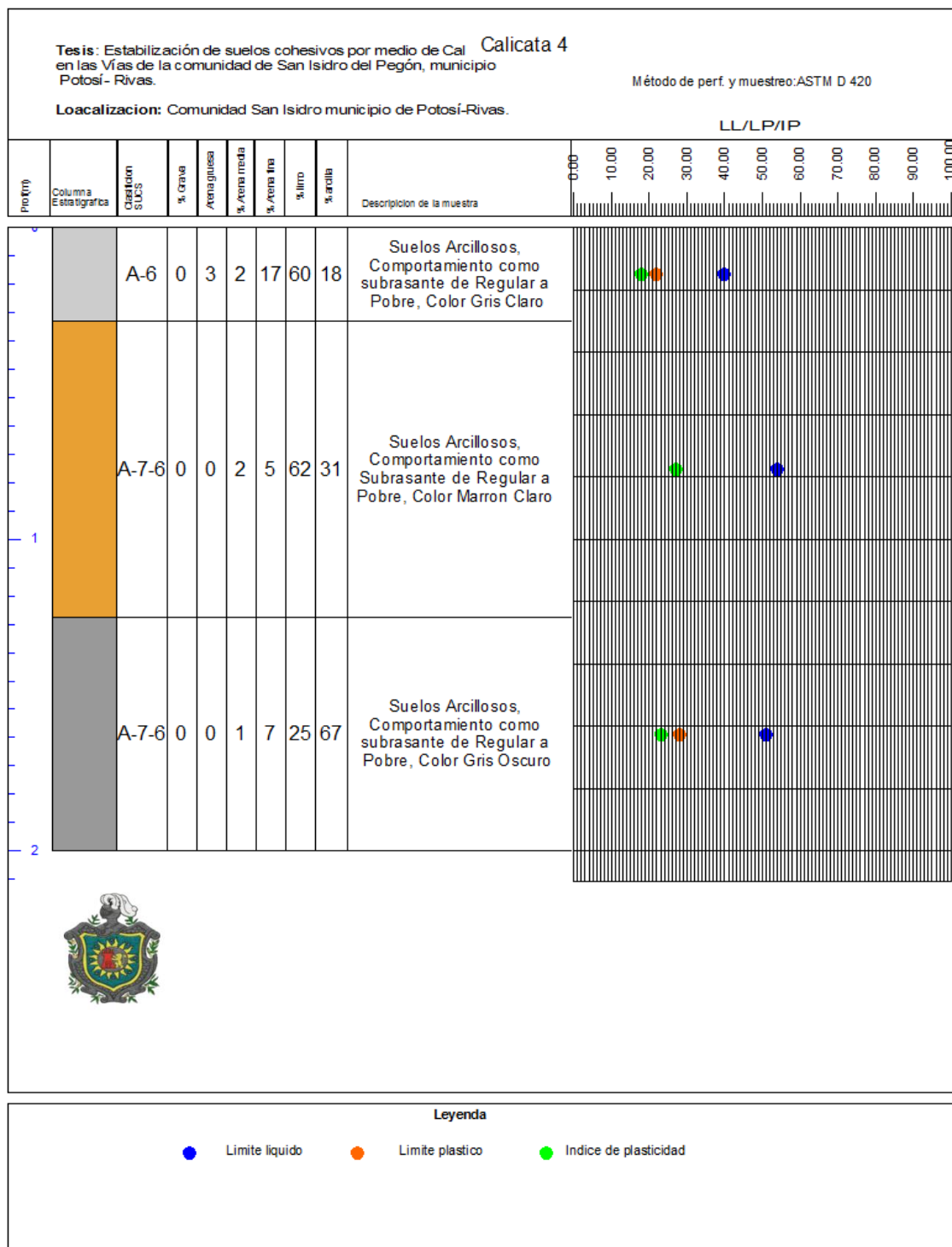


Figura 9.10: Columna Estratigráfica Calicata 4, fuente propia